



TESIS (TM 142501)

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN DAN
PERPINDAHAN PANAS PADA TUBE PLATEN
SUPERHEATER PLTU PACITAN**

KURNIADI HERU PRABOWO

2112 204 809

DOSEN PEMBIMBING

Prof. Dr.Eng. Ir. Prabowo, M.Eng.

PROGRAM MAGISTER

BIDANG KEAHLIAN REKAYASA ENERGI

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2015



TESIS (TM 142501)

NUMERICAL STUDY OF FLOW AND HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS ON PLTU PACITAN PLATEN SUPERHEATER TUBE

KURNIADI HERU PRABOWO

2112 204 809

SUPERVISOR

Prof. Dr.Eng. Ir. Prabowo, M.Eng.

MASTER PROGRAMME

FIELD STUDY OF ENERGY ENGINEERING

DEPARTEMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY

SEPULUH NOPEMBER INSTITUT OF TECHNOLOGY

SURABAYA

2015

**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)**

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember


Oleh :

**KURNIADI HERU PRABOWO
NRP. 2112204809**

**Tanggal Ujian : 13 Januari 2015
Periode Wisuda : Maret 2015**

Disetujui oleh:

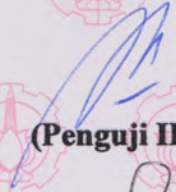
**1. Prof. Dr.Eng. Ir. Prabowo, M.Eng.
NIP. 196505051990031005**


(Pembimbing)

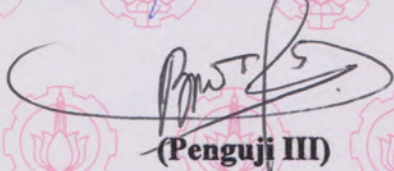
**2. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.
NIP. 197104051997021001**


(Penguji I)


**3. Ary Bachtiar K.P., S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197104051997021001**


(Penguji II)

**4. Dr. Bambang Arif D., S.T., M.Sc.Eng.
NIP.197804012002121001**


(Penguji III)

Direktur Program Pascasarjana,


**Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.
NIP. 196404051990021001**

STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN DAN PERPINDAHAN PANAS PADA TUBE PLATEN SUPERHEATER PLTU PACITAN

Nama : Kurniadi Heru Prabowo
NRP : 2112204809
Pembimbing : Prof. Dr.Eng. Ir. Prabowo, M.Eng

ABSTRAK

Studi kasus pada PLTU unit Pacitan dengan kapasitas beban 2x315 MWe. *Boiler* merupakan salah satu *main unit* dalam sistem PLTU dengan *tube superheater* sebagai pemanas. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui laju perpindahan panas di *tube platen superheater* (PSH).

Penelitian ini diawali dengan pembuatan geometri model 2D, *meshing*, dan menentukan *boundary condition* dengan *software* GAMBIT 2.4.6. Dengan *software fluent* 6.3.26, mode penyelesaian menggunakan *k-epsilon enhanced wall treatment*, persamaan *energy*, SIMPLEC. Variasi yang digunakan adalah beban operasi *boiler maximum continuous rate* dan *boiler maximum rate*.

Hasil dari simulasi ini adalah *nusselt number* rata-rata terbesar terjadi pada grup *tube* PSH 1 sisi *inlet*. Tidak ada perbedaan signifikan distribusi *nusselt number* pada grup *tube* PSH dalam kedua variasi beban operasi. Pada sudut $90^\circ < \theta < 180^\circ$, *nusselt number* lokal rata-rata *tube* PSH 13C sisi *inlet* meningkat 92,2% terhadap *tube* PSH 12C sisi *inlet*. Pada sudut $0^\circ < \theta < 90^\circ$, *nusselt number* lokal rata-rata *tube* PSH 13C sisi *outlet* meningkat 40,6% terhadap *tube* PSH 12C sisi *outlet*. Hal ini menunjukkan laju perpindahan panas *tube* PSH dengan *longitudinal pitch ratio* 1,11 adalah kurang baik.

Kata Kunci : *Nusselt number, aligned tubebanks, longitudinal pitch ratio, pemodelan CFD.*

Halaman ini sengaja dikosongkan.

NUMERICAL STUDY OF FLOW AND HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS ON PLTU PACITAN PLATEN SUPERHEATER TUBE

Name : Kurniadi Heru Prabowo
NRP : 2112204809
Supervisor : Prof. Dr.Eng. Ir. Prabowo, M.Eng

ABSTRACT

Study case in PLTU Pacitan with load 2x315 MWe. Boiler is a main unit in PLTU system with superheater tubes as heat exchanger. The purpose of this study is knows heat transfer in platen superheater (PSH) tubes.

The study begin from makes 2D geometry model, meshing, filling boundary condition with GAMBIT 2.4.6. Software fluent 6.3.26 used k-epsilon enhanced wall treatment, energy, SIMPLEC as solver mode. The load variation in this study used boiler maximum continuous rate dan boiler maximum rate.

The conclusion this study is biggest average of nusselt number occurred at 1st group of PSH tubes. There is no significantly different of nusselt number distribution on the both load variation. In angle $90^\circ < \theta < 180^\circ$, average of local nusselt number on 13rd C inlet side increase 92,2% than average of local nusselt number on 12nd C inlet side. In angle $0^\circ < \theta < 90^\circ$, average of local nusselt number on 13rd C outlet side increase 40,6% than average of local nusselt number on 12nd C outlet side. Thats mean heat transfer of PSH tubes with longitudinal pitch ratio 1,11 is not good.

Keyword : *Nusselt number, aligned tubebanks, longitudinal pitch ratio, CFD model.*

Halaman ini sengaja dikosongkan.

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan petunjuk dan kekuatan sehingga penyusun dapat menyelesaikan tesis sebagai persyaratan akademis untuk memperoleh gelar Magister Teknik di Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penyusun menyampaikan banyak terima kasih dalam penyusunan tesis ini kepada :

1. Prof. Dr.Eng. Ir. Prabowo, M.Eng selaku dosen pembimbing tesis.
2. Prof. Ir. Sutardi, M.Sc. PhD, selaku koordinator S-2 jurusan teknik mesin ITS.
3. Dr. Wawan Aries W., ST. MT., Ary Bachtiar K.P, ST. MT. PhD., dan Dr. Bambang Arip D., ST. MSc.Eng. selaku dosen penguji.
4. Seluruh jajaran direksi PJBS yang telah memberikan kesempatan studi S2 jurusan teknik mesin ITS.
5. Bapak Sandjojo dan Ibu Wanti Y. Selaku orangtua, Novita S.A. dan Indri H. selaku kakak yang selalu memberikan menyayangi dan memberikan nasihat.
6. Istriku Punita S.L dan kedua anakku Lituhayu Chiara Nareswari dan Nayahna Lintang Pramesti yang selalu memberikan motivasi untuk segera menyelesaikan studi S-2.
7. Seluruh dosen dan karyawan jurusan teknik mesin ITS yang banyak membantu dalam menyelesaikan studi S2 jurusan teknik mesin ITS.
8. Rekan-rekan S-2 jurusan teknik mesin untuk sharing segala masalah studi S2 dan penyusunan tesis.
9. Rekan-rekan PJBS di PLTU Pacitan yang telah banyak membantu melengkapi data pendukung laporan tesis.

Penyusun menyadari bahwa tesis ini jauh dari sempurna, saran dan masukan yang bersifat membangun sangat penyusun harapkan.

Surabaya, 20 Januari 2015

Penyusun

Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xv
 BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Manfaat	3
1.5 Batasan Masalah	3
1.6 Asumsi	3
 BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	
2.1 <i>Boiler</i>	5
○ PLTU Unit Pacitan	5
○ <i>Targeted Boiler Management (TBM)</i>	7
2.2 Penelitian Terdahulu	8
2.2.1 Analisa Numerik Temperatur <i>Platen Superheater</i>	8
2.2.2 Percobaan Perlakuan Panas di <i>Reheater Power Plant</i>	9
○ Pengukuran <i>Off-line</i>	10
2.2.3 Perpindahan Panas dan Aliran pada Silinder.....	11
2.2.4 Aliran <i>Flue Gas</i> di Area <i>Superheater</i>	13
2.2.4 Analisa Pengaruh <i>Longitudinal Pitch</i> pada Kasus Perpindahan Panas <i>Tube Bank</i> Secara <i>Cross Flow</i>	14
2.3 Teori Penunjang	16
2.3.1 Definisi Perpindahan Panas	16

2.3.2	Jenis Perpindahan Panas	16
2.3.2.1	Perpindahan Panas Konduksi	16
2.3.2.2	Perpindahan Panas Konveksi.....	17
	o Bilangan Tak Berdimensi.....	18
2.3.2.3	Perpindahan Panas Radiasi.....	19
2.3.3	Parameter Perpindahan Panas.....	20
2.3.3.1	Kecepatan Konduksi.	20
2.3.3.2	<i>Thermal Properties</i>	20
2.4	Metode Numerik.....	20
2.4.1	GAMBIT (<i>Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit</i>).....	21
	o Membuat Geometri.....	21
	o Proses <i>Meshing</i>	21
	o Penentuan <i>Boundary Type</i>	22
2.4.2	<i>Fluent</i>	23
BAB 3	METODOLOGI PENELITIAN	
3.1	Langkah – Langkah Penelitian.....	27
3.1.1	Tahap <i>Pre-Processing</i>	27
	o Pengumpulan Data.....	27
	o Pembuatan Geometri.....	29
	o Pembuatan <i>Meshing</i>	29
	o Penentuan <i>Boundary Type</i>	30
3.1.2	Tahap <i>Solver</i>	30
	o Model <i>Solver</i>	30
	o Pendefinisian Material.....	31
	o <i>Grid</i> independensi.....	31
3.1.3	Tahap <i>Post-Processing</i>	32
3.2	Diagram Alir Penelitian.....	32
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1	Kondisi Aliran <i>Flue Gas</i> di Area <i>Tube</i> PSH.....	33

4.2	<i>Nusselt Number</i> Rataan pada Grup <i>Tube</i> PSH.....	35
4.3	<i>Nusselt Number</i> Lokal <i>Tube</i> PSH Sisi <i>Inlet</i> - <i>Outlet</i>	36
	o Laju Perpindahan Panas di Kedua Sisi <i>Tube</i>	36
	o Laju Perpindahan Panas di <i>Tube</i> PSH 1C, 7C, dan 13C Sisi <i>Inlet</i>	37
	o Laju Perpindahan Panas di <i>Tube</i> PSH 1C, 7C, dan 13C Sisi <i>Outlet</i> ..	39
4.4	Validasi.....	48
4.5	<i>Wall Y</i> +.....	50
 BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan.....	51
5.2	Saran.....	52
 DAFTAR PUSTAKA		53
LAMPIRAN		55
RIWAYAT PENULIS		69

Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Parameter Utama <i>Boiler</i> (Desain <i>Boiler</i>).....	5
Tabel 2.2	Pengukuran Temperatur Gas di Area <i>Reheater Tube</i>	11
Tabel 2.3	<i>Boundary Condition</i>	15
Tabel 3.1	Data Primer Penelitian.....	27
Tabel 3.2	Data Sekunder Penelitian.....	28
Tabel 3.3	Data Tersier Penelitian.....	29
Tabel 3.4	Model yang Digunakan Dalam Penelitian.....	31
Tabel 3.5	<i>Grid</i> Independensi.....	31
Tabel 4.2	Prosentase Kenaikan Nilai Nu Lokal Rataan pada <i>Tube</i> PSH 13C Sisi <i>Inlet</i> Terhadap <i>Tube</i> PSH 12C Sisi <i>Inlet</i> Setelah Sudut θ 0°.....	43
Tabel 4.2	Prosentase Kenaikan Nilai Nu Lokal Rataan pada <i>Tube</i> PSH 13C Sisi <i>Outlet</i> Terhadap <i>Tube</i> PSH 12C Sisi <i>Outlet</i> Sebelum Sudut θ 90°.....	46
Tabel 4.3	Data Spesifik Peralatan Sensor Temperatur <i>Boiler</i> PLTU Unit Pacitan.....	49

Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	<i>Display Boiler Furnace di Central Control Room (CCR)</i>	2
Gambar 2.1	Tampilan CCR <i>Superheater and Reheater System</i>	6
Gambar 2.2	Strategi <i>On-load TBM</i>	7
Gambar 2.3	<i>Mapping TBM</i> pada Peralatan <i>Platen Superheater</i>	8
Gambar 2.4	(a) Susunan <i>Tube Rear Platen Superheater</i> , (b) Distribusi Temperatur <i>Flue Gas</i> , Zhao, dkk (2010).....	9
Gambar 2.6	Konstruksi <i>Boiler</i> , Gonzalez, dkk (2006).....	9
Gambar 2.7	Area Pengukuran <i>Primary – Secondary Reheater</i> : (a) Tampak Samping, (b) Tampak Atas, Gonzalez, dkk (2006).....	10
Gambar 2.8	Percobaan pada <i>Single Tube</i> dan <i>Single Tube Row</i> , Buyruk (1997).....	11
Gambar 2.9	Nilai <i>Nusselt Number</i> pada <i>Single Tube</i> , Buyruk (1997).....	12
Gambar 2.10	Nilai <i>Nusselt Number</i> pada <i>Single Tube Row</i> , Buyruk (1997).....	12
Gambar 2.11	Susunan <i>Tube Superheater</i> Model Silinder dan <i>Rectangular</i> dengan 2 Dimensi, Lundborg (2005).....	13
Gambar 2.12	Susunan <i>Tube Superheater</i> pada <i>Recovery Boiler</i> , Lundborg (2005).....	13
Gambar 2.13	Profil Kecepatan <i>Flue Gas</i> dengan Model <i>Rectangular</i> , Lundborg (2005).....	14
Gambar 2.14	Profil Kecepatan <i>Flue Gas</i> dengan Model <i>Silinder</i> , Lundborg (2005)..	14
Gambar 2.15	Geometri dan <i>Boundary Condition</i> , Kim, dkk (2006).....	14
Gambar 2.16	<i>Nusselt Number</i> , Kim, dkk (2006).....	15
Gambar 2.17	Perpindahan Panas Konduksi, Incropera, dkk (2001).....	17
Gambar 2.18	Perpindahan Panas Konveksi, Lienhard IV, dkk (1930).....	17
Gambar 2.19	Konduktivitas Termal Bahan , Incropera, dkk (2001).....	20
Gambar 2.20	Jenis Elemen <i>Meshing</i>	22
Gambar 3.1	<i>Meshing</i> Susunan <i>Tube Platen Superheater</i>	29
Gambar 3.2	<i>Meshing Single Tube Platen Superheater inlet 1 E-F</i>	30
Gambar 3.3	Diagram Alir Penelitian.....	32

Gambar 4.1	Distribusi Temperatur <i>Flue Gas</i> di Area <i>Tube</i> PSH.....	33
Gambar 4.2	<i>Pathline</i> Tekanan Statik <i>Flue Gas</i> di Area <i>Tube</i> PSH.....	34
Gambar 4.3	<i>Pathline</i> Kecepatan <i>Flue Gas</i> di Area <i>Tube</i> PSH.....	34
Gambar 4.4	<i>Pathline</i> Temperatur Statik <i>Flue Gas</i> di Area <i>Tube</i> PSH.....	35
Gambar 4.5	Vektor Kecepatan <i>Flue Gas</i> di Sekitar <i>Tube</i> PSH Sisi <i>Inlet</i>	35
Gambar 4.6	<i>Nusselt Number</i> Rataan pada Grup <i>Tube</i> PSH Sisi <i>Inlet</i> dengan Variasi Beban BMCR dan MCR.....	36
Gambar 4.7	<i>Nusselt Number</i> Rataan pada Grup <i>Tube</i> PSH Sisi <i>Inlet</i> dan <i>Outlet</i> dengan Variasi Beban MCR.....	36
Gambar 4.8	<i>Nusselt Number</i> Lokal <i>Tube</i> PSH Sisi <i>Inlet</i> (1C, 1D, 7C, dan 7D) pada Beban MCR.....	37
Gambar 4.9	Distribusi Nu Lokal <i>Tube</i> PSH 1C dan 2C Sisi <i>Inlet</i>	38
Gambar 4.10	Kontur Kecepatan <i>Flue Gas</i> di Sekitar <i>Tube</i> PSH 1C dan 2C Sisi <i>Inlet</i>	38
Gambar 4.11	Kontur Tekanan <i>Flue Gas</i> di Sekitar <i>Tube</i> PSH 1C dan 2C Sisi <i>Inlet</i>	39
Gambar 4.12	Kontur Temperatur <i>Flue Gas</i> di Sekitar <i>Tube</i> PSH 1C dan 2C Sisi <i>Inlet</i>	39
Gambar 4.13	Distribusi Nu Lokal <i>Tube</i> PSH 1C dan 2C Sisi <i>Inlet</i>	40
Gambar 4.14	Kontur Kecepatan <i>Flue Gas</i> di Sekitar <i>Tube</i> PSH 1C dan 2C Sisi <i>Inlet</i>	40
Gambar 4.15	Kontur Tekanan <i>Flue Gas</i> di Sekitar <i>Tube</i> PSH 1C dan 2C Sisi <i>Inlet</i>	40
Gambar 4.16	Kontur Temperatur <i>Flue Gas</i> di Sekitar <i>Tube</i> PSH 1C dan 2C Sisi <i>Inlet</i>	41
Gambar 4.17	Distribusi Nu Lokal <i>Tube</i> PSH 12C dan 13C Sisi <i>Inlet</i>	41
Gambar 4.18	Kontur Kecepatan <i>Flue Gas</i> di Sekitar <i>Tube</i> PSH 12C dan 13C Sisi <i>Inlet</i>	42
Gambar 4.19	Kontur Tekanan <i>Flue Gas</i> di Sekitar <i>Tube</i> PSH 12C dan 13C Sisi <i>Inlet</i>	42

Gambar 4.20	Kontur Temperatur <i>Flue Gas</i> di Sekitar <i>Tube</i> PSH 12C dan 13C Sisi <i>Inlet</i>	42
Gambar 4.21	Distribusi Nu Lokal <i>Tube</i> PSH 12C dan 13C Sisi <i>Outlet</i>	44
Gambar 4.22	Kontur dan <i>Pathline</i> Kecepatan <i>Flue Gas</i> di Sekitar <i>Tube</i> PSH 12C dan 13C Sisi <i>Outlet</i>	44
Gambar 4.23	Kontur dan <i>Pathline</i> Tekanan <i>Flue Gas</i> di Sekitar <i>Tube</i> PSH 12C dan 13C Sisi <i>Outlet</i>	45
Gambar 4.24	Kontur Temperatur <i>Flue Gas</i> di Sekitar <i>Tube</i> PSH 12C dan 13C Sisi <i>Outlet</i>	45
Gambar 4.25	Distribusi Nu Lokal <i>Tube</i> PSH 1C dan 2C Sisi <i>Outlet</i>	47
Gambar 4.26	Kontur Kecepatan <i>Flue Gas</i> di Sekitar <i>Tube</i> PSH 1C dan 2C Sisi <i>Outlet</i>	47
Gambar 4.27	Kontur Tekanan <i>Flue Gas</i> di Sekitar <i>Tube</i> PSH 1C dan 2C Sisi <i>Outlet</i>	48
Gambar 4.28	Kontur Temperatur <i>Flue Gas</i> di Sekitar <i>Tube</i> PSH 1C dan 2C Sisi <i>Outlet</i>	48
Gambar 4.29	Posisi <i>Sensor Temperatur Area Outlet</i> PSH.....	49
Gambar 4.30	Kondisi <i>Sensor Temperatur</i> Terpasang dan <i>Spare Part</i>	49
Gambar 4.31	Nilai <i>Wall Y+</i>	50

Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anis, M.R. (2011), *Perencanaan Pemanas Udara Tipe Compact Heat Exchanger dengan Memanfaatkan Panas dari Flue Gas untuk Pengeringan Batubara Low Rank di PT.PJB Paiton Probolinggo*, Tugas Akhir, ITS, Surabaya.
2. Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P., Dewitt, D.P., (2012), *Fundamentals of Heat Transfer*, 6th Edition, John Wiley and Sons Inc., New York.
3. Buyruk, E. (1997), “*Heat Transfer and Flow Structures Around Circular Cylinders in Cross-Flow*”, Tr. J. of Engineering and Environmental Science, 23 (1999) , hal. 299-315.
4. Dongfang Boiler Group CO.LTD, (2009), *Result of Heat Transfer Performance Calculation for Boiler*, Document No. 110M-JS2HGW, Timas Suplindo, Pacitan
5. Dongfang Electric, *Boiler*, Training handout: Boiler Operation Manual, North-West Power, Xi'an.
6. Gonzalez, M.M.P., Garcia, F.J.F., Ramon, I.S., Roces, H.S. (2006), “*Experimental Thermal Behavior of a Power Plant Reheater*”, Energy 31, hal 665-676.
7. Kim, T., Hwang, D., Lee, C., Kim, K. (2006), Effect of Longitudinal Pitch on the Convection Heat Transfer From the Tube Banks in Crossflow, Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Eds: Deokjin-Dong et al, Atomic Energy Research Instittut, Gyeongju.
8. Lienhard IV, J.H. dan Lienhard V, J.H., (2012), *A Heat Transfer Textbook*, 4th Edition, Phlogiston Press, Massachusetts.
9. Lundborg, A. (2005), *Simulation of the Flue Gas Flow Through The Superheater in Recovery Boiler*, Thesis M.Sc., KTH-Royal Institute of Technology, Stockholm.

10. Sichuan Electric Power (2013), *Boiler Performance Test Report of Unit No. 1*, SCCTI-XNSY-GL-BG-001-2009A, PT. PLN(Persero), Pacitan.
11. Tuakia, F., (2008), *Dasar-Dasar CFD Menggunakan Fluent*, Informatika, Bandung.
12. Zhao, X., Li, K., Wei, C. (2010), *The Numerical Analysis Method for Tube Wall Temperature of Superheater*”, College of Energy and Mechanical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin.

RIWAYAT PENULIS



KURNIADI HERU PRABOWO, lahir di Cepu, 25 Maret 1982. Memulai pendidikan di SDN 03 Cepu, melanjutkan ke SMPN 02 Cepu dan SMUN 01 Cepu. Pada 18 September tahun 2000 mulai menempuh pendidikan S-1 Jurusan Teknik Industri ITS dan lulus 15 Maret 2005.

Pada tahun 2006 penulis bekerja di PT. Yamaha Music Manufacturing Indonesia selama setahun di bagian *project* PPTT. Pada tahun 2007, pindah ke PT. Schneider Electric sebagai *method engineering*. Sejak 14 September 2008 hingga saat ini penulis bekerja di PJBS. Pengalaman bekerja di bidang pembangkitan antara lain *operator* lokal *boiler* PLTU 2x400 MWe Paiton, *operator central control room boiler* PLTU 3x330 MWe Indramayu, dan *engineering system owner boiler* PLTU 2x315 MWe Pacitan. Pada tahun 2013, Penulis menempuh pendidikan S-2 Jurusan Teknik Mesin ITS dengan bidang studi Rekayasa Energi.

Untuk memudahkan kritik dan saran yang membangun dapat mengirimkan email ke: khp_st@yahoo.com

BAB I

PENDAHULUAN

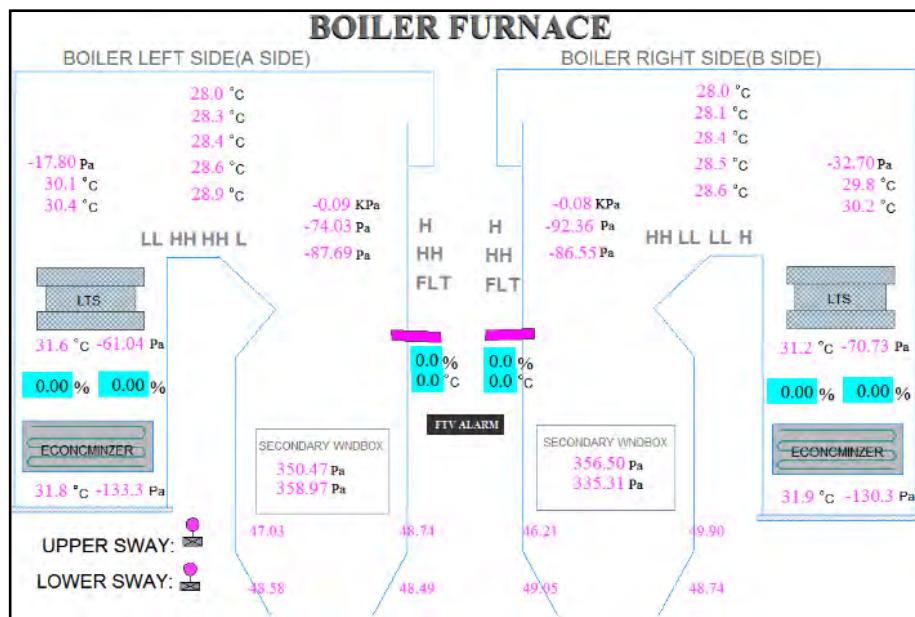
1.1. Latar Belakang

Proyek percepatan diversifikasi energi (PPDE) adalah program pemerintah untuk memenuhi kebutuhan energi listrik. PLTU unit Pacitan merupakan salah satu unit PPDE 10.000 Megawatt tahap 1 dan berkapasitas produksi sebesar 2 x 315 MW. PLTU unit Pacitan diproduksi oleh manufaktur Dongfang China. PLTU unit Pacitan mulai proses konstruksi tahun 2006 dan telah diresmikan pada September 2013.

Dalam bisnis operasi, sistem peralatan di PLTU terdiri atas tiga area. Tiga area tersebut adalah *boiler*, turbin, dan *common*. Area *boiler* dan turbin menjadi area utama dalam PLTU. Sistem operasi *boiler* merupakan sistem yang kompleks karena terdiri atas banyak peralatan. Peralatan yang ada pada sistem operasi *boiler* antara lain *economizer*, *steam drum*, *burner*, *superheater*, *reheater*, *air preheater*, dan *sootblower*.

Economizer adalah peralatan *heat exchanger* air pengisi *boiler*. *Economizer* berfungsi untuk membuat kerja *boiler* lebih efisien. *Economizer* memanaskan air pengisi *boiler* dengan memanfaatkan panas dari aliran *flue gas*. *Steam drum* adalah alat pemisah antara uap basah (*saturated steam*) dengan air. Uap basah dari *steam drum* akan dipanaskan oleh *superheater* hingga menjadi uap kering (*superheated steam*). Uap kering inilah yang akan digunakan untuk memutar turbin *high pressure* (HP).

Setelah memutar turbin HP, uap kering akan menjadi uap basah karena adanya *heat transfer* pada turbin. Uap basah ini akan dikeringkan dengan *reheater*. Uap kering dari *reheater* ini digunakan untuk menggerakkan turbin IP (*intermediate pressure*). *Air preheater* digunakan untuk memanaskan udara *primary* dan *secondary* dengan memanfaatkan panas dari aliran *flue gas*. *Sootblower* adalah alat pembersih jelaga dari campuran kandungan batubara yang tidak terbakar dan menempel pada dinding *boiler* serta *tube superheater*, *reheater*, dan *economizer*.



Gambar 1.1. Display Boiler Furnace di Central Control Room (CCR)

Beberapa PLTU di Indonesia mempunyai susunan serta desain *tube superheater* dan *reheater* yang berbeda. Hal ini akan mempengaruhi kualitas *steam* yang dihasilkan. Kim, dkk (2006) melakukan investigasi hubungan keterkaitan *longitudinal pitch ratio* pada susunan *aligned tube bank* terhadap perpindahan panas yang terjadi.

Penelitian ini membahas karakteristik *heat transfer* pada *tube platen superheater* (PSH) sehingga dapat dijadikan acuan ketika dilakukan *improvement*.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini memiliki rumusan masalah, yaitu :

1. Memodelkan laju perpindahan panas di *tube platen superheater*.

1.3 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mendapatkan hasil simulasi laju perpindahan panas di grup *tube platen superheater*.
2. Mengetahui fenomena laju perpindahan panas *tube platen superheater* 12C dan 13C terhadap *longitudinal pitch ratio*.

1.4 Manfaat

Manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui laju perpindahan panas yang terjadi di sekitar *tube platen superheater*

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah :

1. Area pengamatan adalah area susunan *tube platen superheater*.
2. Penelitian ini hanya membahas laju perpindahan panas
3. Variasi kondisi operasi yang digunakan pada beban *full load* (MCR) dan BMCR
4. Data validasi yang digunakan adalah data aktual *performance test* PLTU unit Pacitan untuk temperatur *flue gas* pada area *outlet platen superheater*.

1.6 Asumsi

Asumsi yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Kondisi *flue gas steady state* dengan *property* konstan (*density, thermal conductivity, viscosity, dan specific heat*).
2. *Density flue gas* sisi *inlet* diasumsikan sama dengan data *flue gas* pada hasil *performance test*.
3. Temperatur *tube platen superheater* diasumsikan sama dengan temperatur *steam* yang terukur pada *header platen superheater*.
4. Temperatur *waterwall right side* diasumsikan sama dengan temperatur *water*.
5. Profil kecepatan pada *flue gas* masuk inlet diasumsikan *uniform*. Profil kecepatan menggunakan data pengukuran manufaktur Dongfang.
6. Tidak ada *slag* yang menempel pada *tube platen superheater dan dinding boiler*.
7. Tidak terjadi *losses* berupa *bottom ash* dan panas *flue gas* keluar *boiler*.
8. Perpindahan panas terjadi secara konveksi dengan temperatur *inlet flue gas*.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Boiler

PLTU Unit Pacitan

Sistem peralatan di *boiler* merupakan salah satu bagian dari *main unit* di pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) unit Pacitan. Kegagalan dalam pengoperasian peralatan di *boiler* dapat mengakibatkan unit menjadi turun beban (*derating*) atau unit mengalami kegagalan operasi (*trip*). Tabel 2.1 menunjukkan parameter-parameter utama *boiler*.

Tabel 2.1. Parameter Utama *Boiler* (Desain *Boiler*)

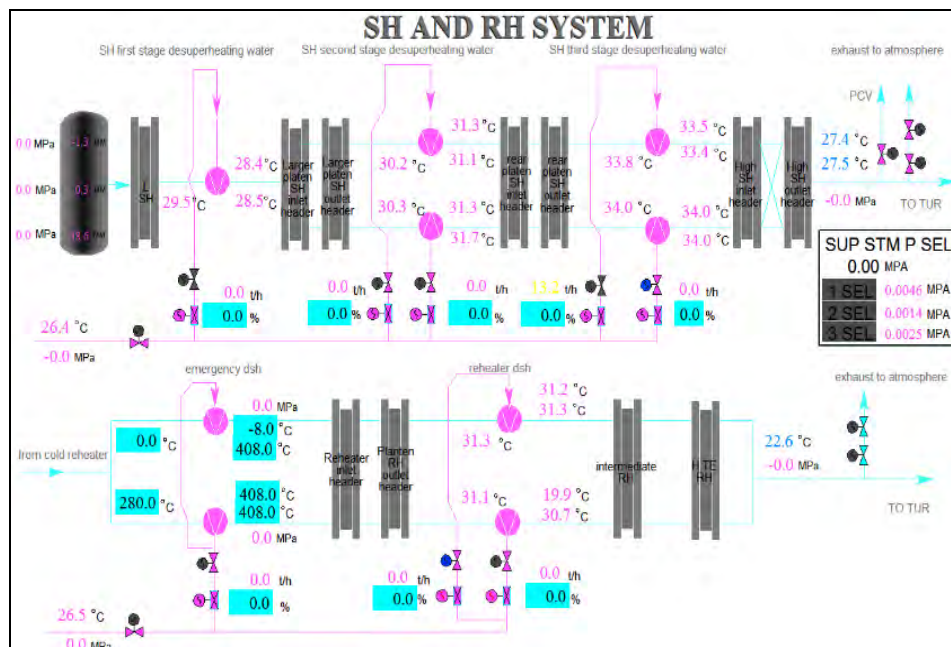
	Item	Unit	Boiler Maximum Continuous Rate	Turbine Maximum Continuous Rate
Boiler parameters	main steam flow	t/h	1025	976.2
	superheat steam pressure	MPa.g	17.4	17.32
	superheat steam temperature	°C	541	541
	reheat steam flow	t/h	839	797.3
	reheat steam pressure inlet/outlet	MPa.g	3.76/3.58	3.57/3.41
	reheat steam temperature inlet/outlet	°C	329/541	323/541
	Feed water temperature	°C	281	277
	Drum pressure	MPa.g	18.58	18.36
	spray flow of primary desuperheater	t/h	15.7	18.54
	spray flow of second desuperheater	t/h	3.93	4.63
	spray flow of reheater	t/h	8.3	4.26
	Flue gas at outlet of furnace	°C	985	973
Flue gas temperature	Outlet of hot reheater	°C	799	793
	Outlet of high temperature superheater	°C	724	719
	Outlet of low temperature superheater	°C	434	434
	Outlet of economizer	°C	384	383
	Flue gas (corrected)	°C	131	131
	Air temperature at inlet of airheater	°C	30	30
	Air temperature at Outlet of airheater (primary air/secondary air)	°C	359/351	359/351
	Fuel consumption (calculated)	t/h	160.28	153.78
	Thermal efficiency (LHV)	%	92.72	92.71

Sumber: *Boiler Performance Test Report of Unit No. 1*

- Flue gas and air system
- Fuel oil system
- Sealing air system
- Superheater and reheater system
- Pulverized coal system

3 sistem kontrol yang sering dilakukan monitoring *display central control room* (CCR) saat beban *full load*. Ketiga bagian itu adalah *pulverized coal system*, *flue gas and air system* dan *superheater and reheater system*.

Superheater and reheater system adalah sistem yang menunjukkan parameter operasi dari *steam superheater* dan *reheater*. *Steam superheater* digunakan untuk menggerakkan turbin *high pressure* (HP turbine) dan *steam reheater* digunakan untuk menggerakkan turbin *intermediate pressure* (IP turbine) dan turbin *low pressure* (LP turbine). Peralatan yang dapat dikontrol dari *superheater and reheater system* adalah *valve desuperheater*. *Desuperheater* adalah sebuah jalur pipa berisi air yang berfungsi menurunkan temperatur *steam* (mencegah terjadi *overheating*).

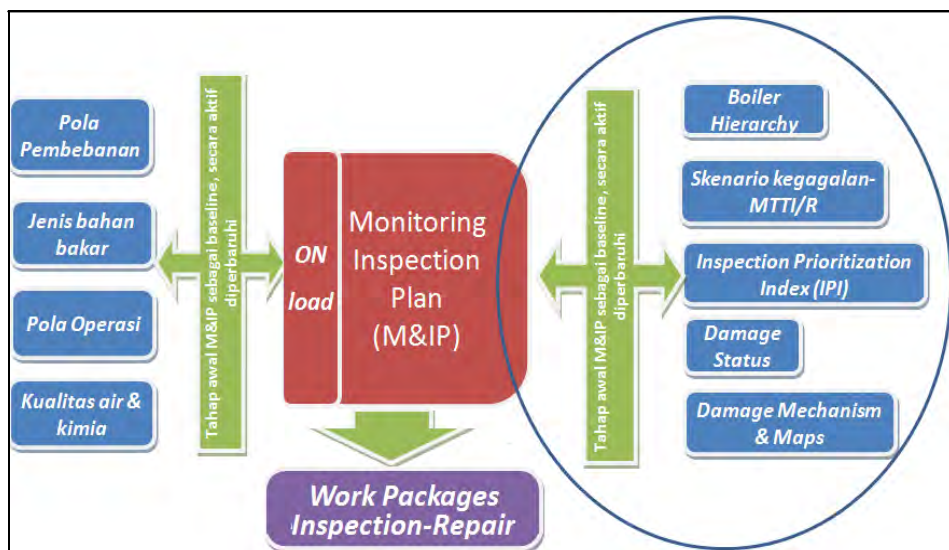


Gambar 2.1. Tampilan CCR *Superheater and Reheater System*

Targeted Boiler Management (TBM)

Targeted boiler management adalah suatu sistem dan metodologi yang terfokus secara prediktif dan proaktif manajemen terhadap *damage mechanism* yang menyebabkan kegagalan pada *tube boiler*. Strategi pemeliharaan *boiler* yang berbasis konsep pemeliharaan secara prediktif dan proaktif bertujuan untuk meningkatkan kehandalan *boiler*.

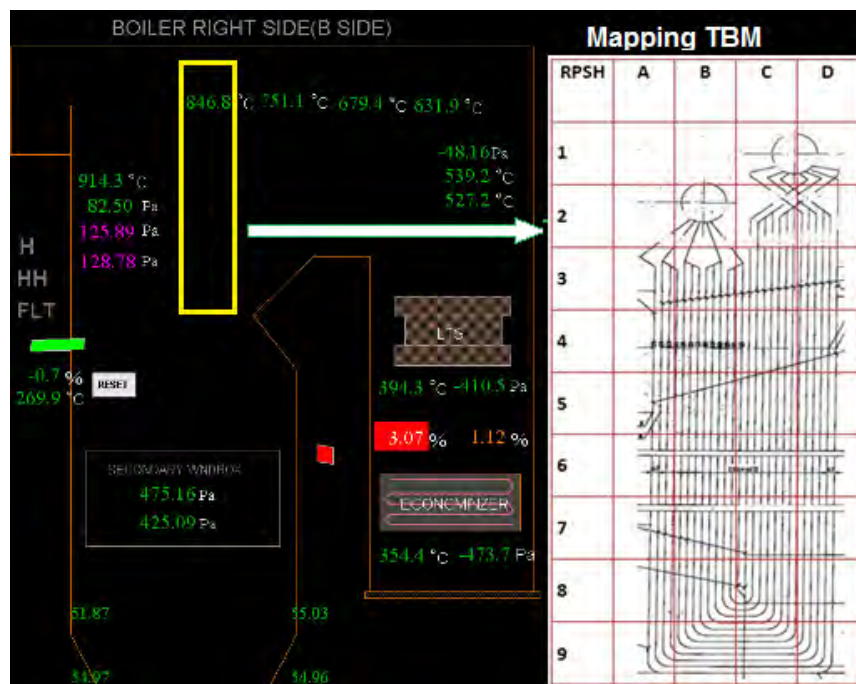
Strategi dalam mengaplikasikan TBM ada dua cara yaitu *on load* dan *off load*. Strategi *on load* adalah memantau parameter operasi, pola pembebanan, kualitas air, jenis bahan bakar, dan lain lain. Pada *off load* melakukan tindakan *preventive* pada saat *boiler shutdown* yang meliputi cek visual, *thickness*, *ultraviolet test* (UT), *vibration test* (VT). Dengan mengetahui hasil simulasi CFD terhadap persebaran panas yang terjadi dapat maka dapat diketahui *tube boiler* sisi mana yang akan beresiko mengalami kegagalan lebih awal. Hasil dari pengecekan ini akan menentukan apakah peralatan harus segera dipelihara atau diganti



Gambar 2.2 Strategi *On load* TBM

Tahapan awal dalam *monitoring inspection plan* (M&IP) adalah penyusunan *boiler hierarchy*. Pada tahap ini dilakukan pemetaan (*mapping*) peralatan. Pemetaan yang sudah dilakukan pada *tube platen superheater* (PSH) adalah pemetaan tampak samping. Setelah dilakukan pemetaan maka dilakukan

identifikasi kegagalan yang mungkin terjadi pada peralatan di area tersebut. Secara berkala tiap tahun tim pemeliharaan melakukan *major overhaul*. Pada peralatan *superheater* dan *reheater*, tim pemeliharaan akan melakukan *sampling test* terhadap beberapa area *tube* yang diidentifikasi berpotensi mengalami kegagalan. Jika tim pemeliharaan menemukan indikasi adanya potensi kegagalan pada 1 tahun operasi ke depan maka tim pemeliharaan akan merekomendasikan untuk mengganti *tube superheater* dan *reheater*.

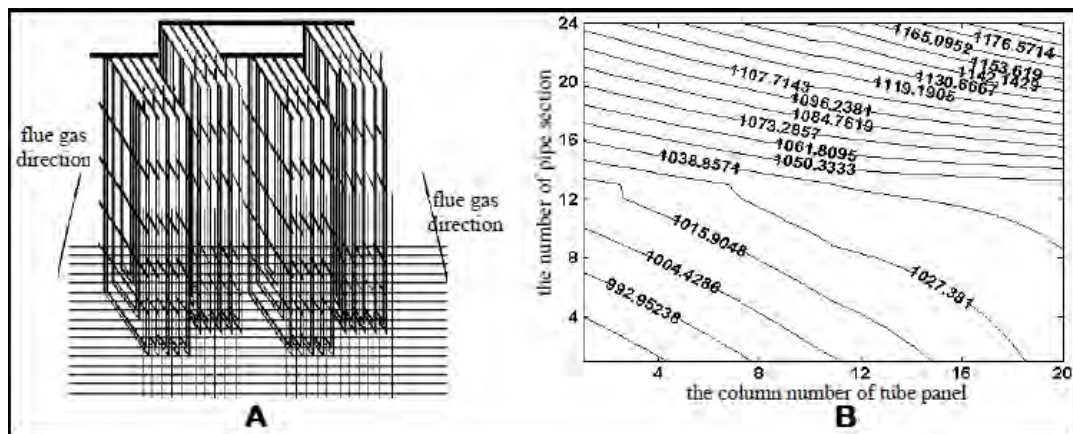


Gambar 2.3 Mapping TBM pada Peralatan Platen Superheater.

2.2. Penelitian Terdahulu

2.2.1. Analisa Numerik Temperatur Platen Superheater

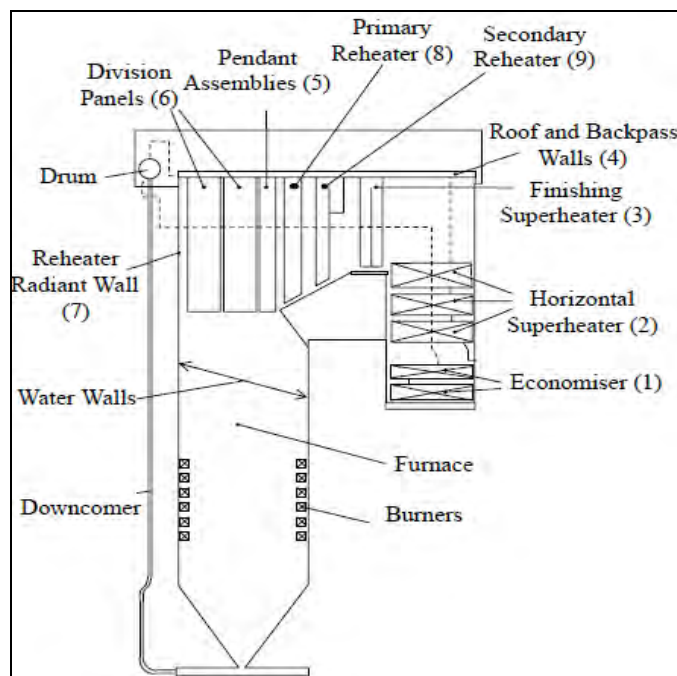
Ketika temperatur *tube platen superheater* melebihi dari temperatur desain, maka harus dilakukan pengecekan agar *lifetime tube platen superheater* tidak pendek. Dalam proses penelitian, Zhao, dkk (2010) melakukan identifikasi distribusi temperatur *flue gas* terhadap fungsi jumlah lajur *platen superheater* dan jumlah *tube* seperti pada gambar 2.4 (b).



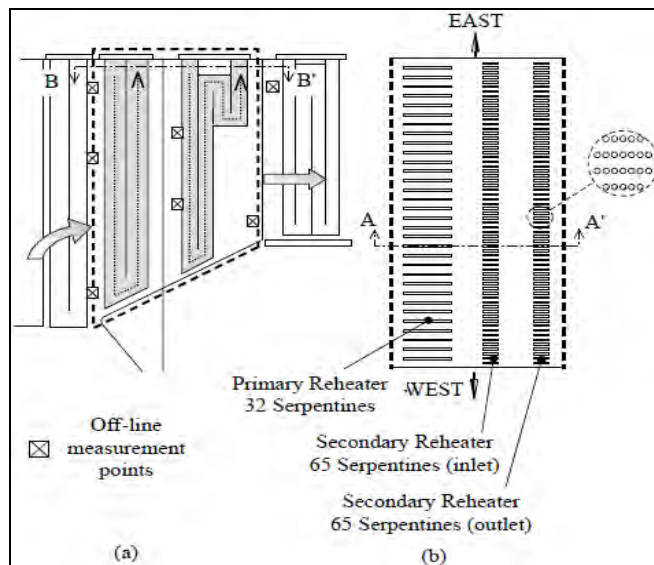
Gambar 2.4 (A).Susunan *Tube Rear Platen Superheater*, (B) Distribusi Temperatur *Flue Gas*, Zhao, dkk (2010)

2.2.2. Percobaan Perlakuan Panas di *Reheater Power Plant*

Kondisi perlakuan panas di komponen *power plant* akan mempengaruhi umur peralatan, *availability* dan efisiensi. M Manuela Prieto Gonzales, dkk (2006) melakukan percobaan pada *reheater tube* untuk mengetahui kegagalan *thickness losses* dan *repetitive tube fissures* dengan metode *on-line* dan *off-line*.



Gambar 2.5. Konstruksi *Boiler*, Gonzalez, dkk (2006)

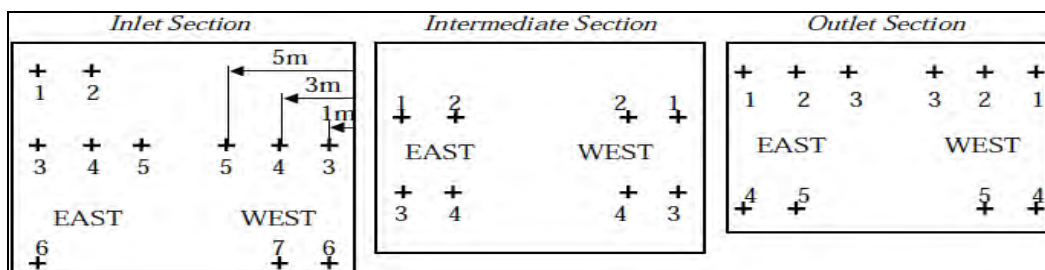


Gambar 2.6 Area Pengukuran *Primary – Secondary Reheater*: (a) Tampak Sampling, (b) Tampak Atas, **Gonzalez, dkk (2006)**

Pengukuran Off-line

Pada pengukuran ini, dilakukan pemeriksaan langsung terhadap ketidakseimbangan aliran fluida dinamik dan komposisi panas gas yang mengalir. Hal ini terjadi dikarenakan adanya ketidakseimbangan pada temperatur *tube*. Variabel pengukuran yang didapatkan adalah data temperatur, kecepatan, *pressure*, dan komposisi *flue gas*.

Pada gambar 2.6(a) menggambarkan posisi pengambilan sampel. Sebuah probe dilengkapi dengan *thermocouple*, sebuah *pitot tube*, dan *suction duct* untuk menangkap *flue gas*. Pengukuran ini juga membagi area pengukuran menjadi 3 bagian yaitu *inlet section*, *intermediate section*, dan *outlet section*



Gambar 2.7 Titik Pengukuran pada *Inlet Section*, *Intermediete Section*, dan *Outlet Section*, **Gonzalez, dkk (2006)**

Dari hasil pengukuran didapatkan data temperatur gas (Tabel 2.2). Fenomena yang terjadi adalah penurunan temperatur gas, kenaikan kecepatan horizontal gas serta kandungan oksigen yang tidak mengalami perubahan. Tidak ditemukan perbedaan besar data hasil pengukuran sisi barat dan timur.

Tabel 2.2. Pengukuran Temperatur Gas di Area *Reheater Tube*

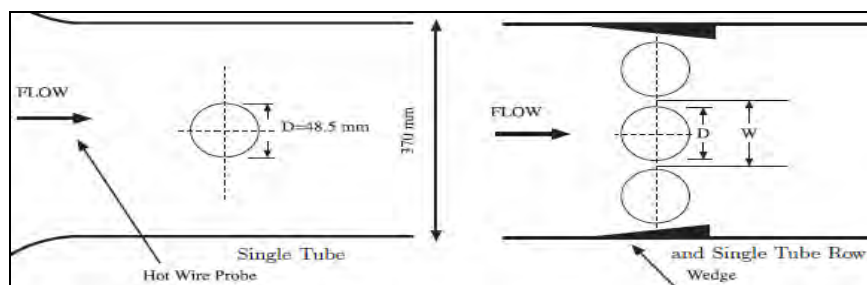
Inlet section			Intermediate section			Outlet section		
Point	East	West	Point	East	West	Point	East	West
1	1096	—	1	1057	1059	1	968	934
2	1122	—	2	1063	1008	2	986	918
3	1134	1148	3	1049	1118	3	996	919
4	1147	1061	4	1125	1101	4	921	1093
5	1153	1078				5	1040	1099
6	1293	1263						
7	—	1513						
Mean	1182 ^a	1138 ^a		1074	1072		982	993

^a Points without a symmetrical are not included in mean (1, 2 and 7, inlet section).

Sumber: Gonzalez, 2006

2.2.3. Perpindahan Panas dan Aliran pada Silinder

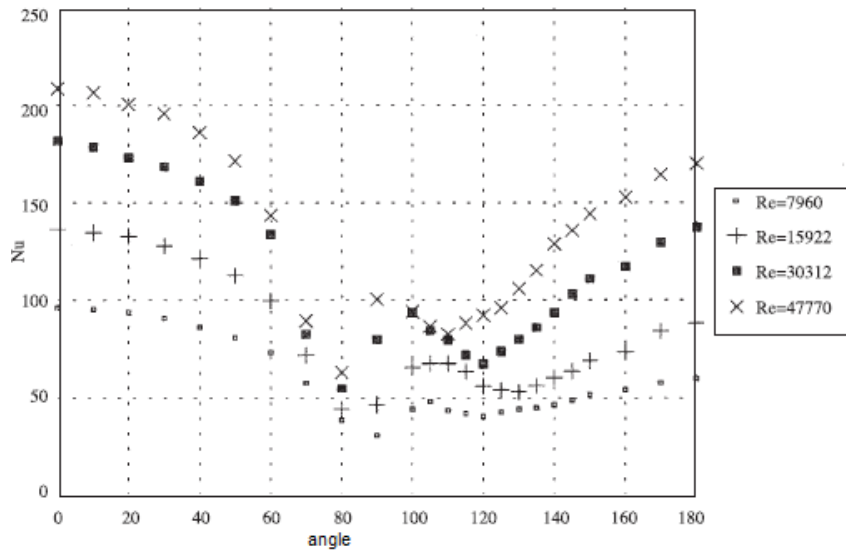
Buyruk (1997) melakukan penelitian tentang suatu aliran yang melintasi silinder secara *cross flow*. Dalam aplikasi dunia industri, penelitian ini berguna untuk memprediksi perpindahan panas yang terjadi pada aliran fluida yang melintasi susunan pipa penukar panas. Tahapan awal adalah melakukan percobaan aliran pada *single tube*.



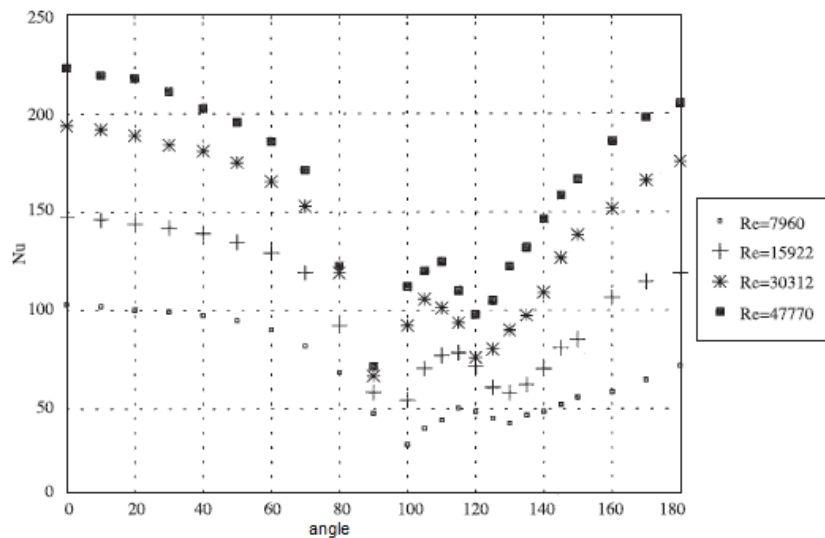
Gambar 2.8 Percobaan pada *Single Tube* dan *Single Tube Row*, **Buyruk (1997)**

Dengan menggunakan *Reynolds number* antara 7960 hingga 47770, penelitian ini memprediksi pengaruh yang terjadi pada sebuah *single tube* dan *single tube row* dengan jarak transversal yang telah ditentukan. Semakin besar

Reynolds number maka nilai *nusselt number* akan lebih besar pula. Buyruk juga memprediksi laju perpindahan panas yang terjadi pada sekitar titik stagnasi.



Gambar 2.9 Nilai *Nusselt Number* pada *Single Tube*, **Buyruk (1997)**

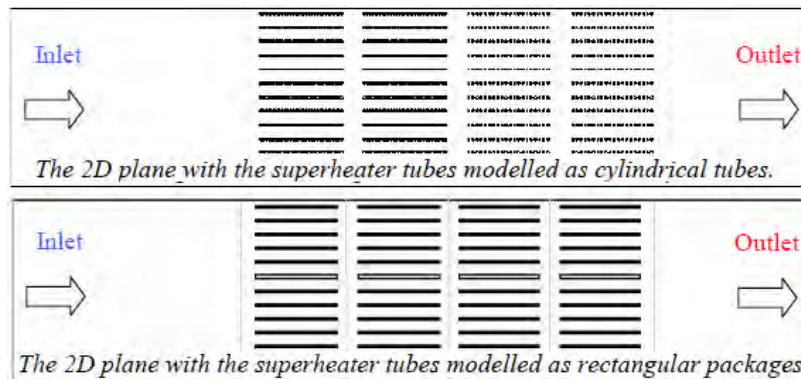


Gambar 2.10 Nilai *Nusselt Number* pada *Single Tube Row*, **Buyruk (1997)**

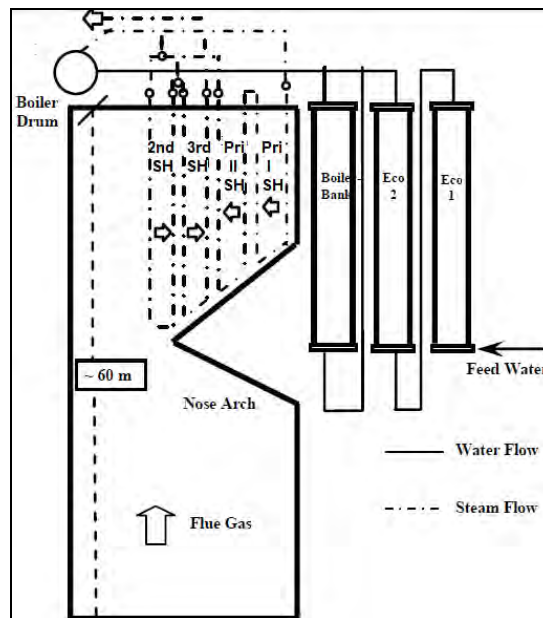
Laju perpindahan panas lokal terbesar terjadi pada titik stagnasi sedangkan laju perpindahan panas lokal terkecil berada di dekat titik separasi. Setelah melewati titik separasi, laju perpindahan panas lokal akan meningkat karena terbentuknya aliran turbulen pada sisi belakang *tube*.

2.2.4. Aliran Flue Gas di Area Superheater

Lundborg (2005) melakukan penelitian numerik pada *superheater recovery boiler* dengan model 2 dimensi. Pada penelitian ini menggunakan *software* GAMBIT dan *fluent* 6.2. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui karakteristik aliran dan perpindahan panas yang terjadi di peralatan *superheater* dengan memodelkan *tube* sebagai silinder dan *rectangular*.

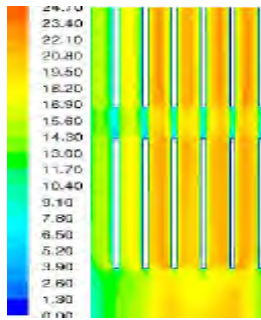


Gambar 2.11 Susunan Tube Superheater Model Silinder dan Rectangular dengan 2 Dimensi, Lundborg (2005)

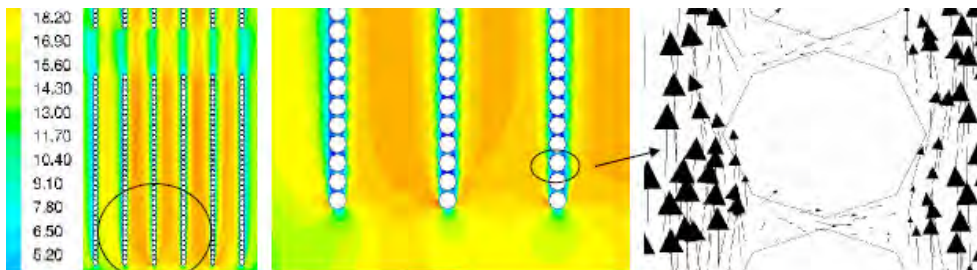


Gambar 2.12 Susunan Tube Superheater pada Recovery Boiler, Lundborg (2005)

Pada penelitian ini, proses pembuatan geometri menggunakan 340.000 *cell*. Di sekitar *tube*, *meshing* lebih kecil (rapat) seperti pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 Profil Kecepatan *Flue Gas* dengan Model *Rectangular*, **Lundborg (2005)**

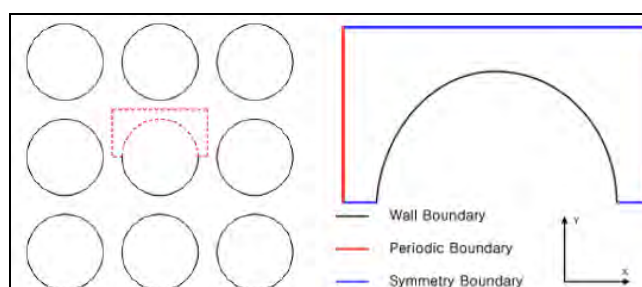


Gambar 2.14 Profil Kecepatan *Flue Gas* dengan Model *Silinder*, **Lundborg (2005)**

Pada penelitian ini menyimpulkan pada model silinder kecepatan *flue gas* maksimal terjadi pada sisi tengah (sudut 90°) lalu kecepatan menurun hingga di antara 2 *wall*. Pada model *rectangular*, kecepatan *flue gas* konstan searah aliran.

2.2.5. Analisa Pengaruh *Longitudinal Pitch* pada Kasus Perpindahan Panas *Tube Bank* Secara *Cross Flow*

Pada penelitian ini, Kim, dkk (2006) melakukan investigasi pengaruh *longitudinal pitch ratio* terhadap perpindahan panas pada *aligned tube bank* dengan menggunakan GAMBIT dan *fluent*.



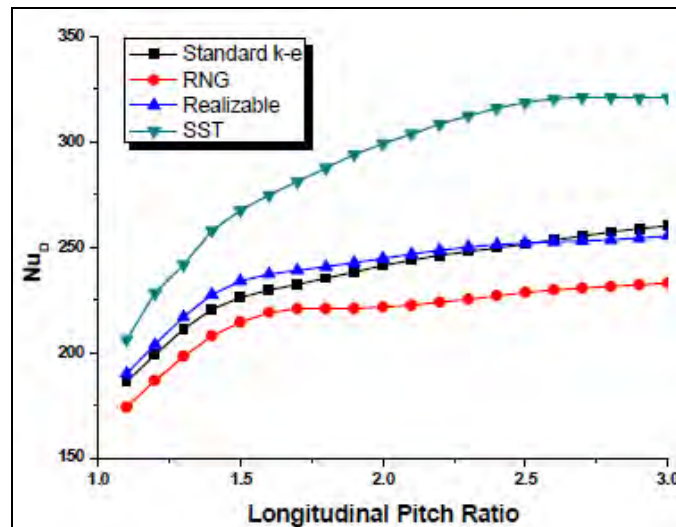
Gambar 2.15 Geometri dan *Boundary Condition*, **Kim, dkk (2006)**

Tabel. 2.3 *Boundary Condition*

Pressure (MPa)	14.7
Bulk Temperature (°C)	310.0
Density (kg/m ³)	702.94
Specific Heat (J/kg-K)	5798.6
Thermal Conductivity (W/m-K)	0.53857
Viscosity (Pa-sec)	8.4186E-4
Wall Temperature (°C)	200
Inlet Mass Flow Rate (kg/sec)	1.4
Longitudinal Pitch Ratio	1.1 – 3.0

Sumber: Kim, dkk (2006)

Diameter *tube* adalah 10 mm dengan besar range rasio *longitudinal pitch* terhadap diameter adalah 1,1 hingga 3 dengan penambahan 0,1. Pada penelitian ini menggunakan 4 model *solver* turbulen (k-epsilon standar, RNG, *realizable* SST). Algoritma penyelesaian menggunakan model SIMPLE dan *second order upwind*.



Gambar 2.16 *Nusselt Number*, Kim, dkk (2006)

Pada gambar 2.16, efisiensi perpindahan panas di permukaan *tube* akan kecil ketika *longitudinal pitch ratio* diperkecil. Penelitian ini memberikan hasil bahwa penentuan *longitudinal pitch ratio* akan sangat berguna untuk mendesain *compact heat exchanger*.

2.3. Teori Penunjang

2.3.1. Definisi Perpindahan Panas

Perpindahan panas adalah proses pelepasan panas dari daerah bersuhu tinggi ke daerah bersuhu rendah. Meskipun secara dasar perpindahan panas adalah sederhana, dalam aplikasi praktis, perpindahan panas menjadi rumit karena sistem aktual yang terjadi berhubungan dengan geometri yang tidak teratur, perpindahan panas yang terjadi, dan respon terhadap fungsi waktu.

2.3.2. Jenis Perpindahan Panas

Ada tiga cara perpindahan panas yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Dalam aplikasi praktis, perpindahan panas dapat terjadi dengan lebih dari 1 cara.

2.3.2.1 Perpindahan Panas Konduksi

Perpindahan panas konduksi adalah perpindahan panas yang terjadi tanpa disertai perpindahan zat. Panas yang diterima dapat berasal dari gas, zat cair, atau benda padat lainnya. Besarnya energi kinetik yang dipengaruhi oleh molekul mengindikasikan besarnya perubahan temperatur yang terjadi. Peningkatan temperatur yang lebih besar menunjukkan adanya energi kinetik yang lebih besar atau besarnya aktivitas molekul.

$$q = k \frac{\Delta T}{L}$$

Dimana,

$$q = Q / A$$

$$q = \text{Laju perpindahan panas per satuan luas (W/ m}^2\text{)}$$

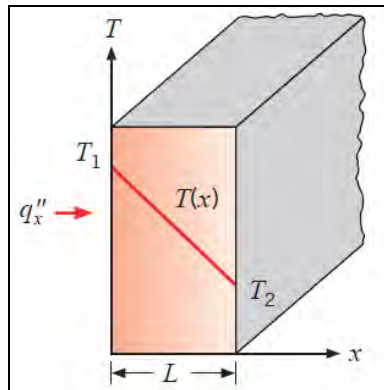
$$Q = \text{Laju perpindahan panas (W)}$$

$$k = \text{Konduktivitas panas yang bernilai konstan (W/m.}^{\circ}\text{C)}$$

$$A = \text{Luas bidang perpindahan panas searah sumbu x (m}^2\text{)}$$

$$\Delta T = \text{Perbedaan temperatur (}^{\circ}\text{C)}$$

$$L = \text{Ketebalan bahan (m)}$$



Gambar 2.17 Perpindahan Panas Konduksi, **Incropera, dkk (2001)**

2.3.2.2. Perpindahan Panas Konveksi

Pada perpindahan panas konveksi terjadi pada fluida (gas atau cair) yang bergerak. Gerakan fluida sebelum mengenai permukaan akan mempengaruhi besarnya perpindahan panas yang terjadi pada permukaan. Perpindahan panas secara konveksi dirumuskan sebagai berikut:

$$q = \bar{h} (T_{\text{body}} - T_{\infty})$$

Dimana,

$$q = Q / A$$

$$q = \text{Laju perpindahan panas per satuan luas (W/ m}^2\text{)}$$

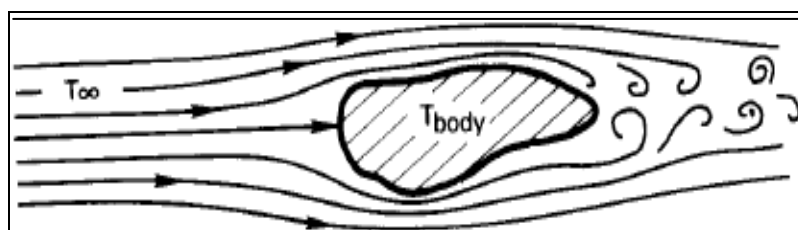
$$Q = \text{Laju perpindahan panas (W)}$$

$$h = \text{Koefisien perpindahan panas (W/m}^2\text{.}^{\circ}\text{C)}$$

$$A = \text{Luas bidang perpindahan panas (m}^2\text{)}$$

$$T_{\text{body}} = \text{Temperatur permukaan benda (}^{\circ}\text{C)}$$

$$T_{\infty} = \text{Temperatur fluida (}^{\circ}\text{C)}$$



Gambar 2.18. Perpindahan Panas Konveksi, **Lienhard IV, dkk (1930)**

Perpindahan panas konveksi ada tiga macam yaitu:

1. Konveksi alami (*natural convection*)

Adalah perpindahan panas konveksi yang terjadi karena berubahnya densitas fluida tersebut yang disebabkan adanya pemanasan.

2. Konveksi paksa (*forced convection*)

Adalah perpindahan panas konveksi konveksi yang berlangsung dengan bantuan peralatan mekanis. Proses perpindahan panas konveksi yang berlangsung terjadi karena adanya fluida mengalir yang disebabkan oleh adanya gaya dari luar dan tanpa disebabkan oleh perbedaan densitas.

3. Konveksi campuran (*mixed convection*)

Adalah perpindahan panas konveksi dimana perpindahan panas konveksi alami dan paksa terjadi secara bersamaan.

Bilangan Tak Berdimensi

Bilangan tak berdimensi (*dimensionless number*) berguna untuk mengetahui kondisi atau karakteristik suatu aliran fluida. Bilangan tak berdimensi bermanfaat pada metode eksperimen yang sama dengan sistem lain. Beberapa macam bilangan tak berdimensi antara lain:

1. *Nusselt number (Nu)*

Nusselt number adalah rasio laju perpindahan panas konveksi terhadap laju perpindahan panas konduksi fluida. *Nusselt number* merupakan fungsi dari *Reynolds* dan *Prandtl number*. Karena *Nusselt number* (Nu) merupakan fungsi terhadap *Reynolds number* (Re) dan *Prandtl number* (Pr) maka dapat dituliskan menjadi persamaan berikut:

$$Nu = C Re^m Pr^{1/3}$$

Dimana :

C : Konstanta persamaan yang didapat dari nilai *reynolds number*

Re : *Reynolds number*

Pr : *Prandtl number*

m : Konstanta persamaan yang didapat dari nilai *reynolds number*

2. *Reynolds number (Re)*

Reynolds number merupakan perbandingan antara gaya inersia dengan gaya kekentalan. *Reynolds number* menunjukkan kondisi aliran fluida pada permukaan benda. Dengan mengetahui nilai *Reynolds number* maka diketahui pula aliran fluida yang terjadi.

Ada tiga macam aliran fluida yaitu laminar, turbulen, dan transisi. Perbedaan kondisi aliran fluida yang terjadi akan mempengaruhi proses perpindahan panas yang terjadi. *Reynolds number* dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Reynolds Number (Re)} = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$$

Dimana:

- P : Density (kg/m³)
- v : Viskositas kinematis (m/s)
- D : Diameter pipa silinder (m)
- μ : Viskositas fluida (kg/m.s)

3. *Prandtl number (Pr)*

Prandtl number merupakan perbandingan viskositas kinematik terhadap difusitas termal fluida. *Prandtl number* menentukan ketebalan relatif dari batas hidro dinamik dan termal *boundary layer* pada kasus perpindahan panas. *Prandtl number* dirumuskan sebagai berikut:

$$Pr = \frac{C_p \times \mu}{k}$$

Dimana,

- C_p : Panas spesifik fluida (J/kg.K).
- μ : Viskositas fluida (kg/m.s).
- k : Konduktivitas termal (J/s.m.K).

2.3.2.3. **Perpindahan Panas Radiasi**

Perpindahan panas radiasi terjadi dengan gelombang elektromagnetik. Perpindahan panas secara radiasi tidak seperti perpindahan panas secara konduksi

dan konveksi karena tidak membutuhkan adanya media dalam proses perpindahannya.

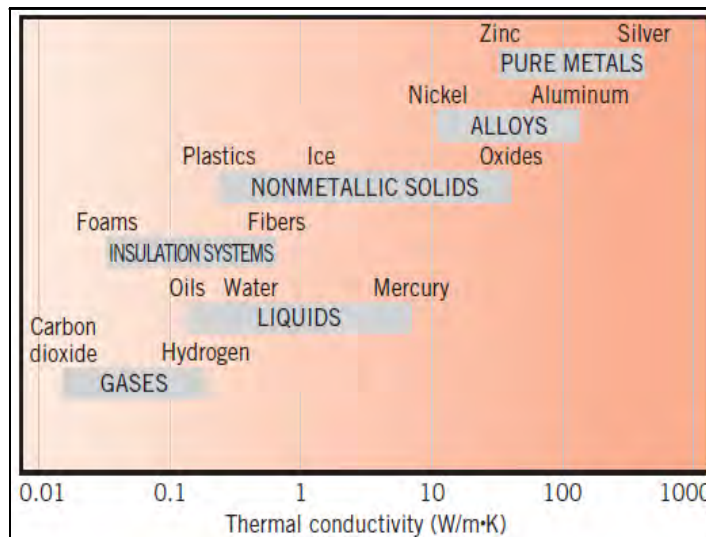
2.3.3. Parameter Perpindahan Panas

2.3.3.1. Kecepatan Konduksi

Dalam aplikasi industri, perpindahan panas konduksi dimanfaatkan sebagai penukar panas. Kecepatan konduksi dipengaruhi oleh *heat flux*. *Heat flux* (W/m^2) adalah nilai perpindahan panas konduksi per satuan luas benda pada sumbu x dan perubahan panasnya terjadi secara *gradient*. Konstanta k merupakan nilai konduktivitas termal (J/s.m.K) suatu benda dan mempengaruhi besarnya *heat flux* yang terjadi.

2.3.3.2. *Thermal Properties*

Konduktivitas termal merupakan salah satu bagian dari *thermal properties* yang akan mempengaruhi perpindahan panas yang terjadi. Gambar 2.19 adalah nilai konduktivitas termal suatu media.



Gambar 2.19 Konduktivitas Termal Bahan, **Incropera, dkk (2001)**

2.4. Metode Numerik

Dalam dunia industri, kegagalan sebuah peralatan akan memberikan kerugian bagi perusahaan itu sendiri. *Computational fluid dynamic* (CFD) adalah

metode numerik yang dapat membantu dalam menganalisa fenomena aliran di dalam dunia industri. Dua *tool software* yang digunakan untuk menghasilkan data fenomena aliran yaitu GAMBIT dan *fluent*.

2.4.1 GAMBIT (*Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit*)

GAMBIT dapat menghasilkan model geometri dari sebuah kasus industri. dan mendefinisikan daerah yang akan dilalui fluida serta melakukan proses *meshing* pada daerah tersebut. Setelah semuanya dilakukan, model tersebut siap untuk dianalisis menggunakan *fluent*.

Membuat Geometri

Teknik pembuatan geometri ada dua cara:

1. Bottom – up

Pembuatan geometri ini dimulai dengan membuat geometri yang paling dasar sampai dengan yang paling rumit. Proses diawali dari pembuatan sebuah titik (*vertex*). Setelah pembuatan titik kemudian memprosesnya menjadi garis (*edge*). Untuk kasus dengan pembuatan model geometri 2 dimensi, garis yang terbentuk digabungkan menjadi bidang (*face*). Jika permodelan geometri berupa 3 dimensi maka proses akhir adalah menggabungkan bidang tersebut menjadi volum.

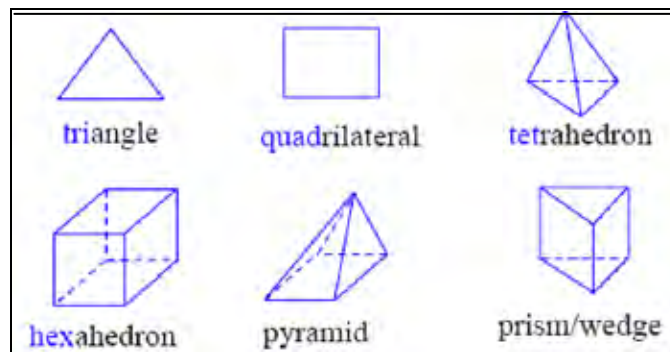
2. Top – down

Pembuatan geometri dengan cara ini dimulai dengan langsung membuat geometri volum dengan memaksimalkan tool 3 dimensi yang tersedia. GAMBIT mempunyai *tool* 3 dimensi dasar, seperti: balok, bola, silinder, dan geometri lainnya. Hasil geometri tersebut kemudian diproses dengan *tool* proses seperti menggabungkan (*unite*), pengurangan (*subtract*), dan irisan (*intersect*).

Proses *Meshing*

Setelah pembuatan geometri selesai, dilakukan proses *meshing* agar desain dapat dianalisa. Penggunaan tipe *mesh* dapat mempengaruhi keakuratan hasil komputasi analisis CFD. Semakin detail / kecil *mesh* yang dipergunakan maka hasil komputasi analisa CFD akan lebih baik namun proses *meshing* akan membutuhkan *size* penyimpanan file yang besar.

Pada proses *meshing* 2 dimensi, GAMBIT mempunyai *tool* elemen bidang segiempat (*quad*) dan bidang segitiga (*tri*). *Quad* dapat digunakan untuk bidang yang simetris dan teratur dan *tri* dipergunakan untuk bidang yang tidak beraturan. Untuk proses *meshing* 3 dimensi, GAMBIT menyediakan *tool* *hex* dan *wedge*.



Gambar 2.20 Jenis Elemen *Meshing*

Penentuan Tipe Batas (*Boundary Type*)

Tipe batas (*boundary type*) adalah pendefinisian kondisi sisi (*face*) pada geometri 3 dimensi dan garis (*edge*) untuk geometri 2 dimensi. Jika ada bagian yang belum terdefiniskan maka dalam *fluent* akan menganggap sebagai dinding (*wall*) secara otomatis. Penentuan tipe batas yang dapat digunakan adalah sebagai berikut:

1. Penentuan sisi *inlet*.

Proses ini adalah menentukan sisi yang menjadi lokasi aliran masuk. Setelah dari proses pemilihan sisi masuk pada *software* GAMBIT dilakukan proses lanjutan pada *software* *fluent*. Pilihan yang tersedia pada *software* *fluent* antara lain *velocity inlet* dan *pressure inlet*.

Dalam dunia industri tidak semua peralatan dilengkapi dengan alat pengukur kecepatan ataupun tekanan. Untuk pengukuran kecepatan bisa didapatkan dari data *mass flow* dan berat jenis fluida

2. Penentuan sisi *outlet*.

Software GAMBIT hanya akan menentukan posisi *outlet* saja. Pada posisi outlet, parameter yang tersedia adalah *pressure outlet* dan *outflow*. Jika nilai

tekanan di sisi outlet diketahui maka sisi *outlet* dapat menggunakan parameter *pressure outlet*.

Pada aplikasi industri, parameter tekanan tidak selalu tersedia. Apabila parameter aliran tidak diketahui maka parameter yang dimasukkan pada sisi *outlet* adalah *outflow*.

3. Penentuan batas.

Langkah ini dipergunakan untuk mengkondisikan aliran sehingga arah aliran dapat mewakili kondisi aktual. Pada beberapa kasus, batas aliran dianggap sebagai *wall*. Pada kondisi ini, maka batas aliran dapat diberikan beban panas sehingga dapat diketahui panas yang diterima oleh *wall*.

Pada kasus yang komplek, pembuatan geometri dapat dilakukan dengan mengambil sebagian dari kondisi aktual. Untuk melakukan hal tersebut, penentuan tipe batas menggunakan pilihan *symmetry*. Dengan cara ini, proses simulasi akan menjadi lebih sederhana dan proses konvergen dalam *fluent* akan lebih cepat.

2.4.2. *Fluent*

Merupakan *software* komputer yang dapat digunakan untuk mensimulasikan kasus aliran. Dengan mensimulasikan aliran ini dapat diketahui fenomena seperti *pressure drop* atau adanya *overheating* pada kasus di industri. *Tool* yang terdapat pada *fluent* adalah sebagai berikut:

1. Model multifasa.

Pada aliran multifasa dapat didefinisikan sebagai suatu tingkat material yang mempunyai respon inersia terhadap aliran dan berinteraksi dengan aliran dan medan potensial yang ada. contohnya adalah material padat dapat diberlakukan pada fasa yang berbeda.

2. Persamaan energi.

Simulasi yang terjadi akan menyesuaikan dengan rumus persamaan energi.

3. Model viskos.

Pada model ini mempunyai pilihan diantaranya adalah *inviscid*, *laminar*, *spalart allmaras*, *k-epsilon*, *k-omega*, *reynold stress*, dan *large eddy simulation* (Khusus 3 dimensi).

A. *Spalart allmaras*.

Spalart allmaras model turbulensi dengan satu persamaan untuk menyelesaikan model persamaan transport untuk viskositas kinematik turbulen. Model ini baru berkembang dan banyak diaplikasikan dalam dunia penerbangan. Bentuk model *spalart allmaras* hanya efektif dengan bilangan *Reynolds number* kecil.

B. *K – epsilon*

Model ini merupakan model semi empiris yang dikembangkan oleh Launder dan Spalding. Model *k-epsilon* merupakan model turbulensi yang cukup lengkap dengan dua persamaan kecepatan turbulen dan panjang skala. Model ini sering digunakan pada simulasi dengan kasus perpindahan panas pada dunia industri.

C. *K – omega*.

Model *K – omega* pada *fluent* memasukkan beberapa modifikasi untuk menghitung efek aliran pada *Reynolds number* rendah, kompresibilitas, dan penyebaran aliran geser (*shear flow*). Model ini diaplikasikan pada aliran dalam saluran dan aliran bebas geseran.

D. *Reynolds stress*.

Reynolds stress merupakan model turbulensi yang paling teliti pada *fluent*. Model ini mendekati persamaan *Navier-stokes* dengan menyelesaikan persamaan *transport* untuk *Reynolds stress* bersama persamaan laju disipasi. Pada model aliran 2 dimensi, model ini 4 persamaan *transport* tambahan. Sedangkan pada aliran 3 dimensi, model ini membutuhkan 7 aliran *transport* tambahan. Model ini tidak selalu memberi hasil yang lebih baik dibandingkan model lain yang lebih sederhana dengan satu atau dua persamaan.

E. *Large eddy simulation* (LES).

Aliran turbulen dapat dilihat dengan adanya *vortex*. Pada umumnya *vortex* yang besar diselesaikan dengan LES sedangkan *vortex* yang kecil dimodelkan. Dengan cara ini, resolusi yang dihasilkan lebih besar dibandingkan *direct numerical simulation* (DNS). Model LES ini

membutuhkan daya komputasi yang jauh lebih besar dan tidak praktis diaplikasikan secara teknis.

4. Model *species transport* dan reaksi.

Model ini digunakan jika kondisi yang disimulasikan berupa reaksi kimia seperti pada proses pembakaran batubara.

5. Model fasa diskrit.

Fluent dapat mensimulasikan suatu fasa diskrit yang berbeda fasa dengan aliran kontinyu dengan memperhitungkan perpindahan massa dan panas dari / ke fasa diskrit tersebut

6. Model pembekuan.

Fluent dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah yang melibatkan pembekuan dan / atau peleburan yang terjadi pada suatu temperatur tertentu (misalnya pada logam murni)

Selain menentukan model yang terjadi, *fluent* juga menyediakan penentuan jenis fluidanya.

1. *Fluid*.

Fluent menyediakan yang tersedia antara lain udara, air, dan beberapa larutan kimia. Jika pilihan *fluid* tidak tersedia, dapat dilakukan pembuatan *fluid* baru dengan memberikan nama dan nilai sifat mekanik baru.

1. *Solid*.

Beberapa pilihan media *solid* yang tersedia antara lain *aluminium*, *steel*, *wood*, dan beberapa media *solid* lainnya. Sama seperti *fluid*, jika benda *solid* yang digunakan tidak tersedia maka *fluent* menyediakan pilihan untuk menentukan media baru dengan pembuatan nama dan sifat mekanik *solid* baru.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Langkah – Langkah Penelitian

CFD merupakan sebuah *tool* untuk mensimulasikan suatu pesawat kerja. CFD dapat digunakan untuk mengetahui fenomena yang terjadi. Fenomena berupa *pressure drop*, *overheating*, tumbukan, dan aliran fluida. Penelitian ini menggunakan 2 *software*. Penyelesaian pada tahap *pre-processing* menggunakan GAMBIT sedangkan pada tahap *solver* dan *post-processing* menggunakan *fluent*.

3.1.1 Tahap *Pre-Processing*

Pengumpulan Data

Tahap *pre-processing* adalah tahap pembuatan geometri. Pada tahap ini yang dilakukan adalah pengumpulan data untuk pembuatan geometri benda.

Tabel 3.1 Data Primer Penelitian

DATA	NILAI	KETERANGAN
Temperatur <i>Inlet flue gas</i>	908.6°C (1181.6°K)	Performance test di CCR kondisi MCR
1. 902.9 (<i>left side</i>) 2. 914.3 (<i>right side</i>)		
Tekanan <i>inlet flue gas</i>	79.415Pa	Performance test di CCR kondisi MCR
1. 76.3 (<i>left side</i>) 2. 82.5 (<i>right side</i>)		
Kecepatan <i>inlet flue gas</i>	6.6 m/s 6.2 m/s	Manufacture test (<i>Dongfang</i>)
1. Kondisi BMCR 2. Kondisi MCR		
Temperatur <i>outlet flue gas</i>	798.4°C (1071.4°K)	Performance test di CCR kondisi MCR
1. 750 (<i>left side</i>) 2. 846.8 (<i>right side</i>)		
Temperatur <i>steam PSH inlet header</i>	449.125°C (722.1°K)	Performance test di CCR kondisi MCR
1. 451.2 (<i>1st left side</i>) 2. 450.5 (<i>2nd left side</i>) 3. 446.3 (<i>1st right side</i>) 4. 448.5 (<i>2nd right side</i>)		
Temperatur <i>steam PSH outlet header</i>		
1. 519.2 (<i>left side</i>) 2. 511.3 (<i>right side</i>)		
	515.25°C (788.3°K)	Performance test di CCR kondisi MCR

Temperatur water (wall)-Right-BMCR	281°C (554°K)	Manufacture test
Temperatur water (wall)-Right-MCR	277°C (550°K)	Manufacture test
Diameter tube PSH	54 mm	Boiler Op. Manual
Tebal tube PSH	8.5 mm	Boiler Op. Manual
Jarak antar tube PSH (SL)	60 mm	Drawing
Jumlah row PSH	21 row	Boiler Op. Manual
Jumlah tube PSH dalam 1 row	13 pcs	Boiler Op. Manual
Total air flow	1207.7T/h (335.5 kg/s)	Performance test di CCR kondisi MCR
Total coal flow	151.7T/h (42.1 kg/s)	Performance test di CCR kondisi MCR
Total fluid flow	1359.4T/h (377.6 kg/s)	Performance test di CCR kondisi MCR

Tabel 3.2 Data Sekunder Penelitian

Data performance test kondisi BMCR	DATA		(% x MW)		HASIL
	CCR	(O ₂)	19.8	x 32.0	= 633.6
	Laporan akhir	(CO ₂)	14.0	x 44.1	= 616.1
	Laporan akhir	(CO)	0.0	x 28.0	= 0.1
	CCR	(NO _x)	6.3	x 46.0	= 289.9
	CCR	(SO ₂)	210.2	x 74.1	= 15567.4
	Total				= 17107.0
	Temperatur flue gas inlet		= 1181.6 K		
	Tekanan inlet		= 79.4 Pa		
	Molecular Weight		= 17107.0		
Data performance test kondisi MCR	DENSITY FLUE GAS		= 0.138 kg/m ³		
	DATA		(% x MW)		HASIL
	CCR	(O ₂)	19.8	x 32.0	= 633.6
	Laporan akhir	(CO ₂)	13.2	x 44.1	= 579.9
	Laporan akhir	(CO)	0.0	x 28.0	= 0.1
	CCR	(NO _x)	6.3	x 46.0	= 289.9
	CCR	(SO ₂)	210.2	x 74.1	= 15567.4
	Total				= 17070.8
	Temperatur flue gas inlet		= 1181.6 K		
	Tekanan inlet		= 79.4 Pa		
	Molecular Weight		= 17070.8		
	DENSITY FLUE GAS		= 0.138 kg/m ³		

Tabel 3.3 Data Tersier Penelitian

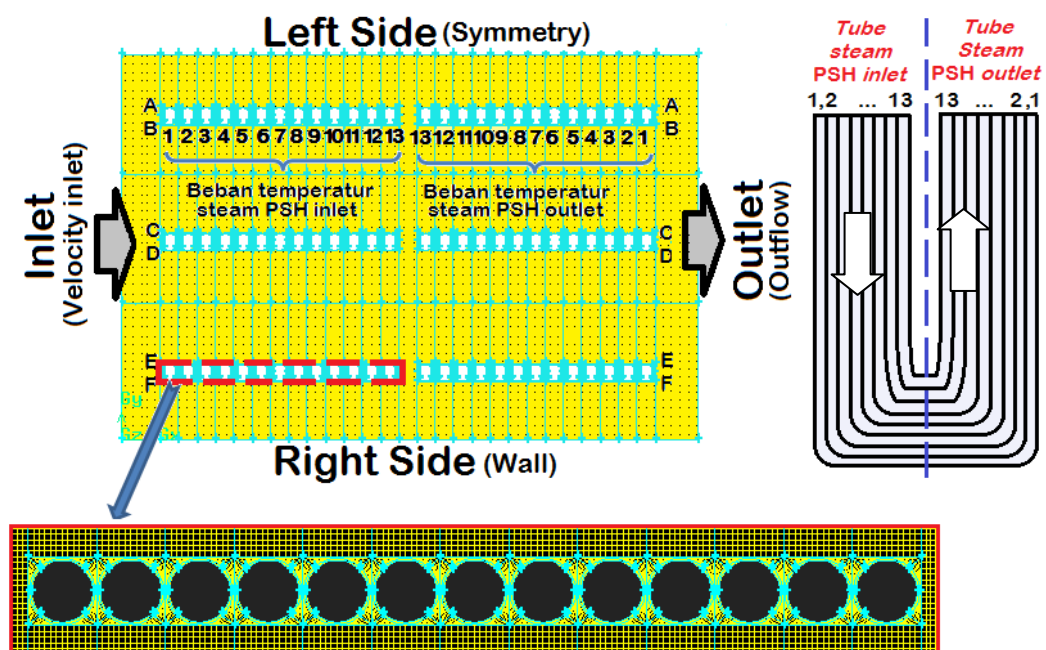
DATA	NILAI	KETERANGAN
Koefisien panas <i>flue gas</i> (Cpfg)	1089 J/kg.K	PLTU unit Paiton
Konduktivitas termal <i>flue gas</i> (Kfg)	0.031 W/m.K	PLTU unit Paiton
Viskositas gas buang (Vfg)	2.438×10^{-5} m ² /s	PLTU unit Paiton
<i>Density steel</i>	8030 kg/m ³	<i>Fluent</i>
Koefisien panas <i>steel</i> (Cps)	502.48 J/kg.K	<i>Fluent</i>
Konduktivitas termal <i>steel</i>	16.27 W/m.K	<i>Fluent</i>

Pembuatan Geometri

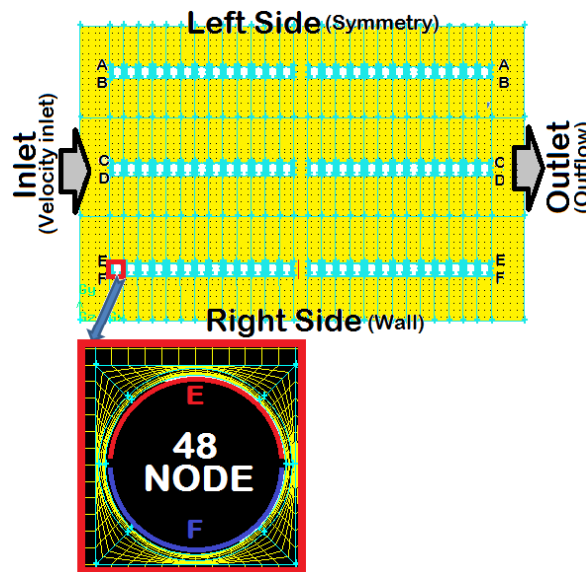
Pada tahap ini dilakukan dengan cara *bottom-up*. Proses pembuatan *boiler* diawali dengan pembuatan titik. Kemudian dilakukan pembuatan garis dengan menghubungkan ke titik-titik tersebut. Langkah terakhir adalah menggabungkan garis tersebut menjadi sebuah bidang.

Pembuatan Meshing

Pada proses ini digunakan elemen *quad* dengan 48 *node* pada *tube*. Gambar 3.1 merupakan hasil *meshing* susunan *tube platen superheater* pada 1/7 bagian dari area *platen superheater* keseluruhan dengan pandangan tampak atas.



Gambar 3.1. Meshing Susunan Tube Platen Superheater



Gambar 3.2. *Meshing Single Tube Platen Superheater Inlet 1 E-F*

Penentuan *Boundary Type*

Tahapan ini mendefinisikan batasan aliran fluida, sisi masuk, sisi keluar, dan penentuan *tube*.

1. Sisi *inlet flue gas* didefinisikan dengan *velocity inlet*.
2. Sisi *outlet flue gas* didefinisikan dengan *outflow*.
3. Sisi atas (*left side*) didefinisikan sebagai *symmetry*.
4. Sisi bawah (*right side*) didefinisikan sebagai *wall*.
5. *Tube platen superheater* didefinisikan sebagai *wall*.

Setelah menentukan *boundary type*, data disimpan dengan tipe *msh* agar dapat diproses dengan *fluent*.

3.1.2 Tahap *Solver*

Data *performance test* dijadikan data pendukung untuk menentukan beban panas *steam* yang diterima oleh *tube*.

Model *Solver*

Permodelan ini adalah 2 dimensi dengan formulasi *solver pressure based*. *Solver pressure based* akan menyelesaikan persamaan matematis secara bertahap atau terpisah antara satu persamaan dengan persamaan yang lain. Formulasi kecepatan yang dipilih adalah *absolut* pada kondisi *steady*.

Tabel 3.4. Model yang Digunakan Dalam Penelitian

MODEL	KETERANGAN	DASAR PEMILIHAN
<i>Multiphase model</i>	Off	<i>Single phase</i>
<i>Energy</i>	On	Terjadi proses perpindahan panas
<i>Viscous</i> (model turbulensi)	<i>K-ε standard</i> - <i>Pressure gradient effect</i> - <i>Thermal effect</i>	Dapat digunakan dalam simulasi <i>heating</i>
<i>Radiation</i>	Off	Dianggap tidak terjadi radiasi
<i>Species transport & reaction</i>	Off	Tidak ada proses reaksi kimia

Pendefinisian Material

Tipe material yang digunakan adalah *flue gas* sebagai *fluid* dan *steel* sebagai material *solid* untuk *tube boiler*. Data material menggunakan tabel 3.2 dan tabel 3.3

Grid Independensi

Grid independensi menyatakan kestabilan data hasil yang didapat pada *meshing* yang terpilih. Batas penerimaan *meshing* adalah jika perubahan yang terjadi kurang dari 1%. Pada tabel 3.5 terpilih model *meshing* kedua sebagai model simulasi karena *gap* antar hasil *nusselt number* pada titik stagnasi di *tube platen superheater* aliran in 1C adalah lebih kecil daripada 1%.

Tabel 3.5. *Grid* Independensi

ITERASI	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3
100	50.3048	49.2378	48.8235
200	50.5265	49.428	49.0167
300	50.5138	49.4149	49.0072
400	50.5088	49.4113	49.0041
500	50.5079	49.4109	49.0041
600	50.5076	49.4105	49.0035
700	50.5074	49.4104	49.0029
800	50.5073	49.4104	49.0028
900	50.5073	49.4106	49.0029
1000	50.5075	49.4107	49.0031
Avg	50.48989	49.4107	48.98708
PROSES		MODEL 1-2	MODEL 2-3
<i>Grid</i> Independensi		2.17%	0.83%

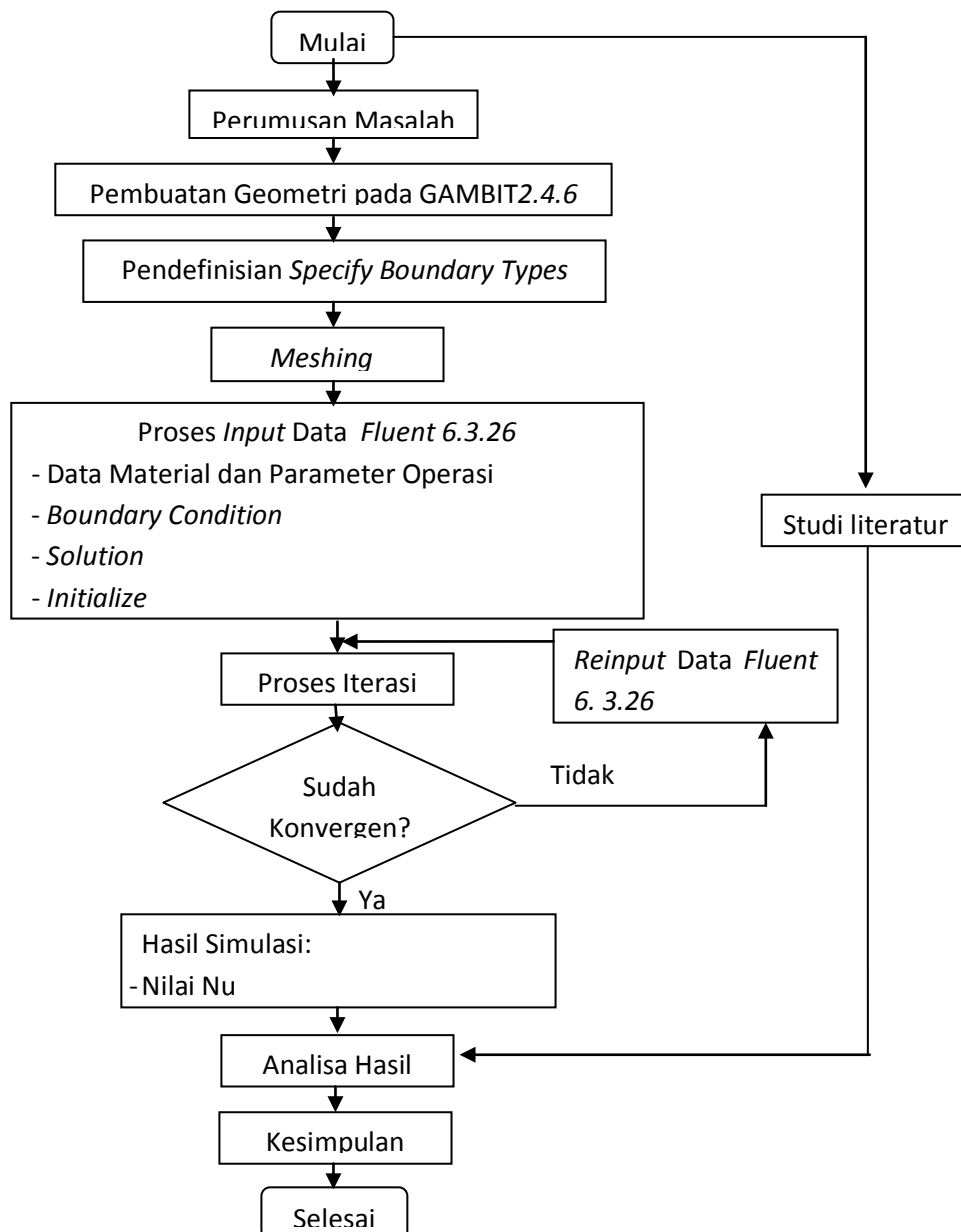
3.1.3 Tahap *Post-Processing*

Pada tahapan ini dilakukan interpretasi dari data simulasi. Hasil simulasi dari pemodelan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Plot* grafik x-y untuk *surface nusselt number*.
2. *Mapping* hasil *nusselt number* terhadap kelompok urutan *tube PSH*.

3.2. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian menjelaskan proses yang dilakukan pada penelitian ini:

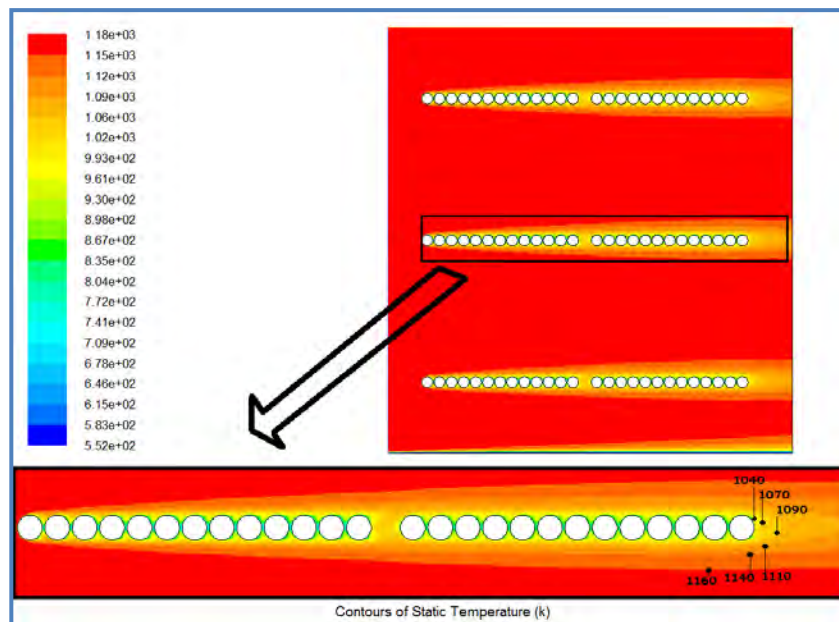


BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Kondisi Aliran *Flue Gas* di Area *Tube* PSH

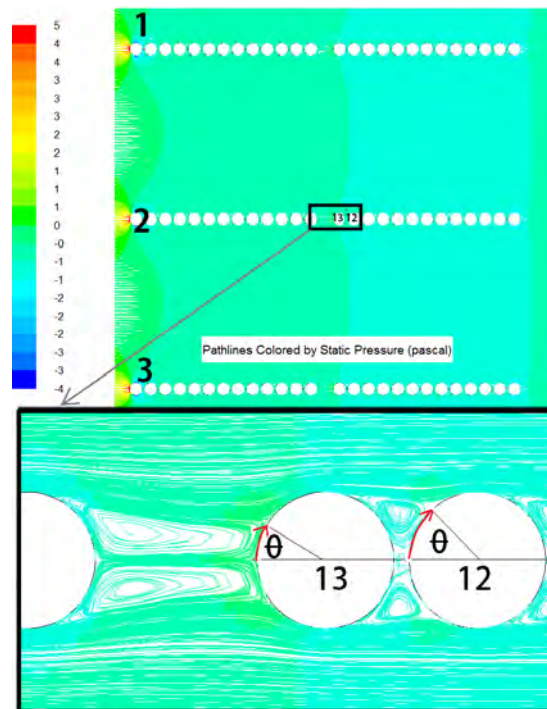
Hasil simulasi dapat menunjukkan data karakteristik aliran *flue gas* di sekitar area *tube* PSH sisi *inlet*. Gambar 4.1 menunjukkan distribusi temperatur *flue gas* di sekitar area tube PSH. Secara umum distribusi temperatur *flue gas* seimbang di area *tube* PSH. Besarnya jarak *transversal* antar *tube* menunjukkan pemanfaatan perpindahan panas *flue gas* menjadi kurang maksimal..



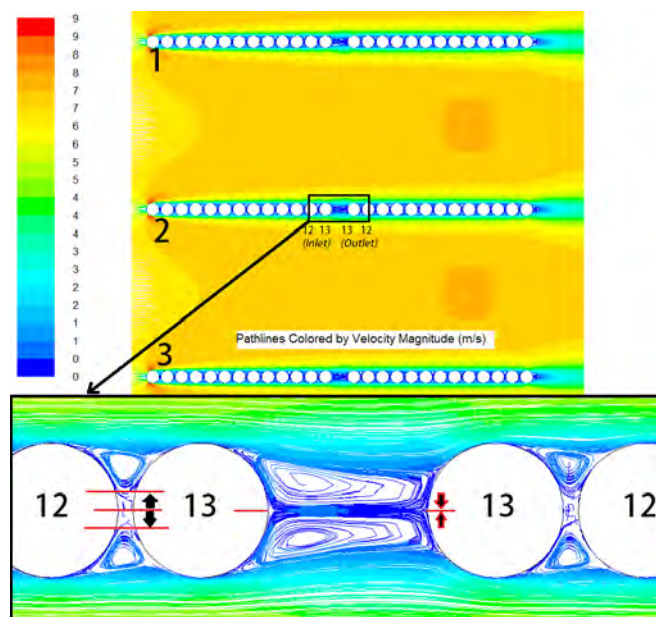
Gambar 4.1 Distribusi Temperatur *Flue Gas* di Area *Tube* PSH

Gambar 4.2 adalah *pathline* tekanan statik yang menunjukkan adanya perbedaan titik *attack* dari *flue gas* pada *tube* terhadap perbedaan *longitudinal pitch ratio*. Gambar 4.3 adalah *pathline* kecepatan *flue gas*. gambar ini menunjukkan pada susunan *tube* dengan *longitudinal pitch ratio* 1,11, aliran *flue gas* di sekitar sudut 180 seolah-olah diam. Hal ini menyebabkan laju perpindahan panas tidak maksimal. Gambar 4.4 adalah *pathline* temperatur *flue gas*. Distribusi aliran *flue gas* pada sekitar susunan *tube* dengan *longitudinal pitch ratio* 2,18 lebih merata dibandingkan dengan *longitudinal pitch ratio* 1,11. Gambar 4.5 menunjukkan kecepatan *flue gas* di sekitar *tube* PSH 1, 7, dan 13 sisi *inlet*. Pada

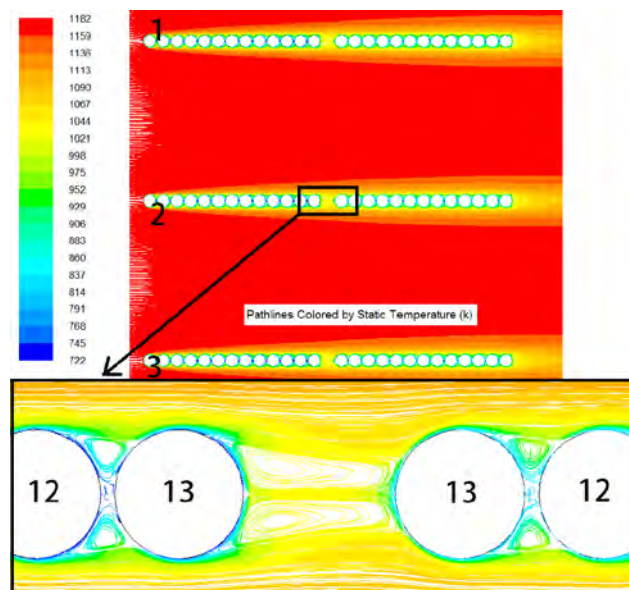
tube PSH 1C sisi *inlet* Kecepatan *flue gas* yang rendah pada sekitar daerah stagnasi akan terus meningkat hingga mencapai batas kecepatan tertinggi pada sudut 90° . Setelah itu kecepatan *flue gas* menurun hingga minimal (separasi).



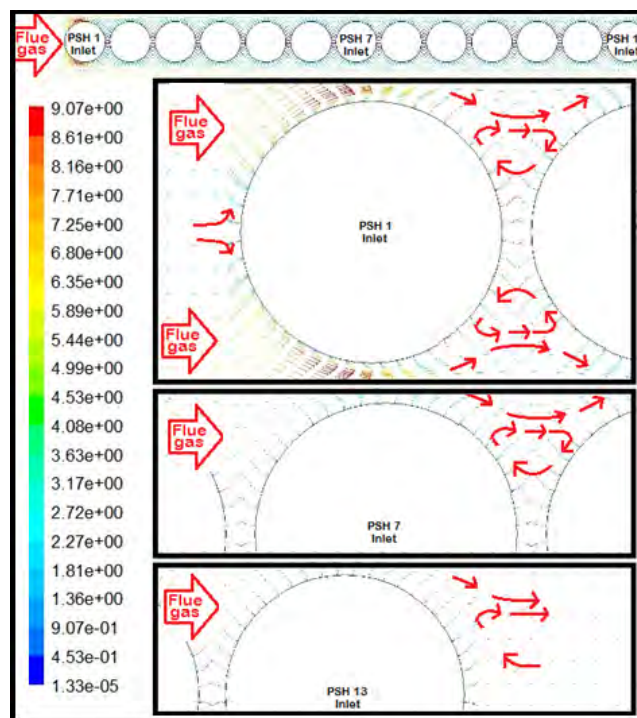
Gambar 4.2 *Pathline* Tekanan Statik *Flue Gas* di Area *Tube* PSH



Gambar 4.3 *Pathline* Kecepatan *Flue Gas* di Area *Tube* PSH



Gambar 4.4 *Pathline* Temperatur Statik *Flue Gas* di Area *Tube* PSH

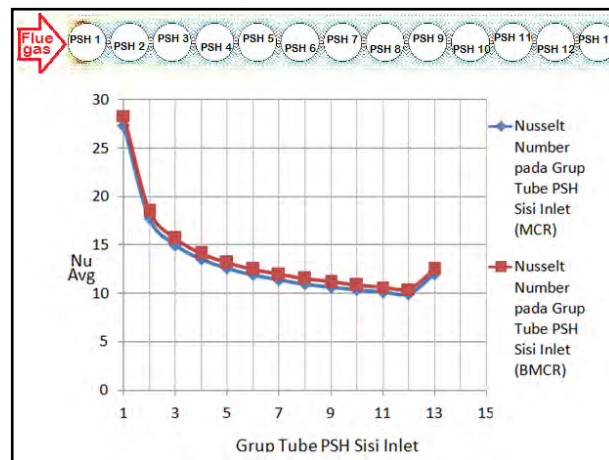


Gambar 4.5 Vektor Kecepatan *Flue Gas* di Sekitar *Tube* PSH Sisi *Inlet*

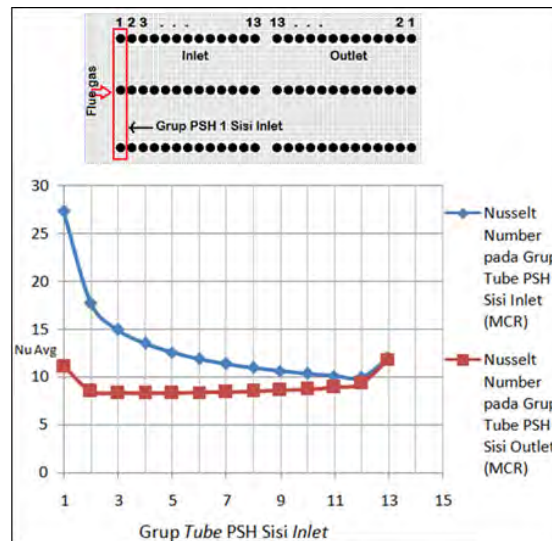
4.2. *Nusselt Number* Rataan pada Grup *Tube* PSH

Dari hasil simulasi, pola *Nu* rata-rata grup *tube* PSH pada beban MCR sama dengan pada beban BMCR. *Nusselt number* rata-rata pada beban BMCR sedikit lebih tinggi dibandingkan pada beban MCR. Hal ini dikarenakan kecepatan *inlet*

flue gas pada beban BMCR lebih tinggi daripada saat beban MCR. Hal tersebut sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.6 dan 4.7.



Gambar 4.6 *Nusselt Number* Rataan pada Grup *Tube PSH Sisi Inlet* dengan Variasi Beban BMCR dan MCR.



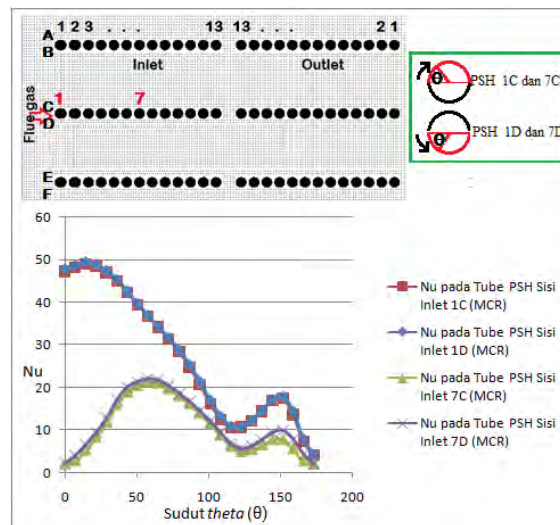
Gambar 4.7 *Nusselt Number* Rataan pada Grup *Tube PSH Sisi Inlet* dan *Outlet* dengan Variasi Beban MCR.

4.3 *Nusselt Number* lokal *Tube PSH Sisi Inlet - Outlet*

Laju Perpindahan Panas di Kedua Sisi *Tube*

Gambar 4.8 merupakan distribusi *Nu* lokal *tube PSH sisi inlet* (1C, 1D, 7C, dan 7D) dalam kondisi beban MCR. Distribusi *Nu* lokal pada *tube PSH* 1C mempunyai pola dan nilai yang hampir sama dengan distribusi *nusselt number* lokal pada *tube PSH* 1D dan distribusi *Nu* lokal pada *tube PSH* 7C mempunyai

pola dan nilai yang hampir sama dengan distribusi Nu lokal pada *tube* PSH 7D. Hal ini menunjukkan laju perpindahan panas pada kedua sisi *tube* seimbang.



Gambar 4.8 *Nusselt Number* Lokal *Tube* PSH Sisi *Inlet* (1C, 1D, 7C, dan 7D) pada Beban MCR

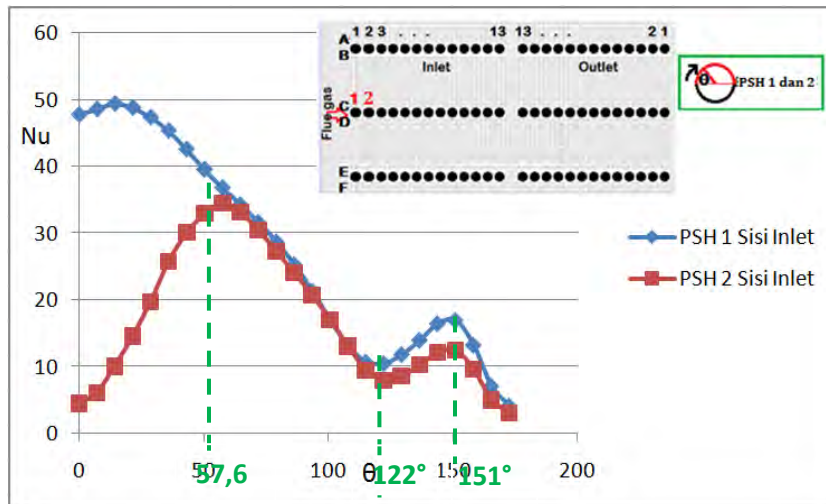
Laju Perpindahan Panas di *Tube* PSH 1C, 7C, dan 13C Sisi *Inlet*

- *Tube* PSH 1C dan 2C Sisi *Inlet*

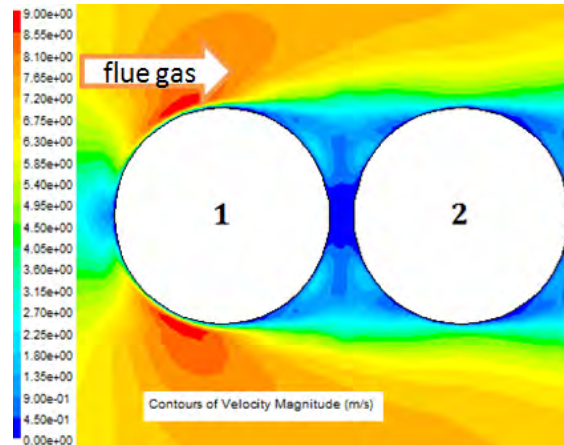
Laju perpindahan panas dapat diketahui dari besarnya nilai Nu. Nu lokal adalah nilai Nu pada titik *tube* yang telah ditentukan. Pada gambar 4.9, nilai Nu lokal maksimal *tube* 1C sisi *inlet* terjadi pada daerah sekitar stagnasi. Sedangkan pada *tube* 2C, nilai Nu lokal maksimal terjadi pada sudut 57,6°. Pada sisi belakang *tube*, nilai Nu lokal akan terus menurun hingga sudut 122°. Penurunan ini disebabkan karena penurunan nilai kecepatan. Peningkatan nilai Nu lokal terjadi setelah sudut 122°, hal ini disebabkan aliran *flue gas* sudah membentuk *wake*. Distribusi Nu lokal setelah sudut 151° mulai terjadi penurunan yang disebabkan oleh nilai *longitudinal pitch ratio* antara *tube* PSH 1C dan 2C kecil.

Gambar 4.10 menunjukkan kontur kecepatan *flue gas* dengan kecepatan maksimal terjadi pada sudut 90°. Setelah melalui sudut 90° terjadi penurunan kecepatan *flue gas* sangat rendah seolah-olah tidak ada aliran. Fenomena ini yang menunjukkan penurunan nilai Nu lokal setelah sudut 151°. Pada *tube* PSH 2C sisi *inlet* juga terjadi penurunan nilai Nu lokal pada sudut 151° dikarenakan *longitudinal pitch ratio* dengan *tube* PSH 3C sisi *inlet* sebesar 1,11.

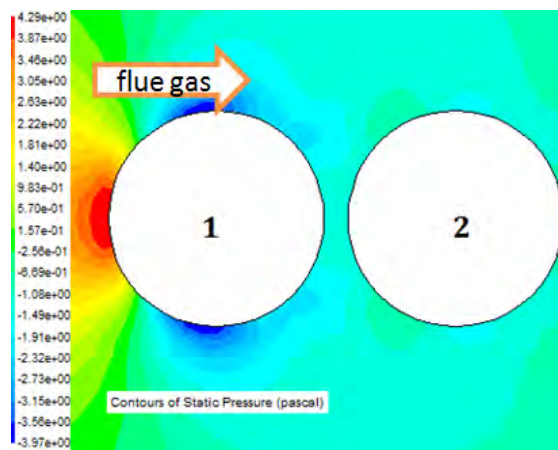
Gambar 4.11 dan 4.12 menunjukkan distribusi tekanan dan temperatur *flue gas* di sekitar *tube* PSH 1C dan 1D sisi *inlet*. Hal ini mengindikasikan adanya *attack effect* dari aliran *flue gas* setelah melalui *tube* PSH 1C sisi *inlet*. Pada posisi sekitar sudut 60° - 90° terjadi peningkatan nilai tekanan aliran *flue gas* di sekitar *tube* PSH 2C sisi *inlet*.



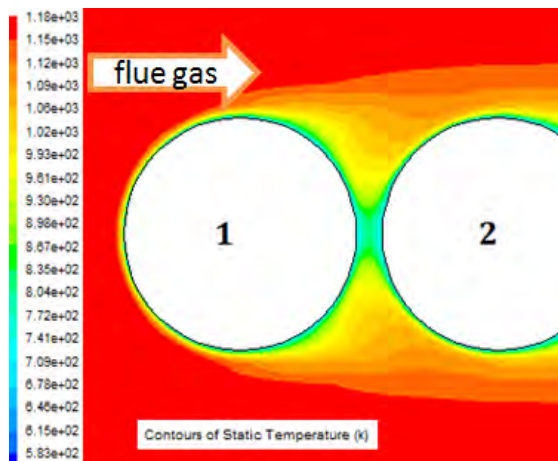
Gambar 4.9 Distribusi Nu lokal *Tube* PSH 1C dan 2C Sisi *Inlet*



Gambar 4.10 Kontur Kecepatan *Flue Gas* di Sekitar *Tube* PSH 1C dan 2C Sisi *Inlet*



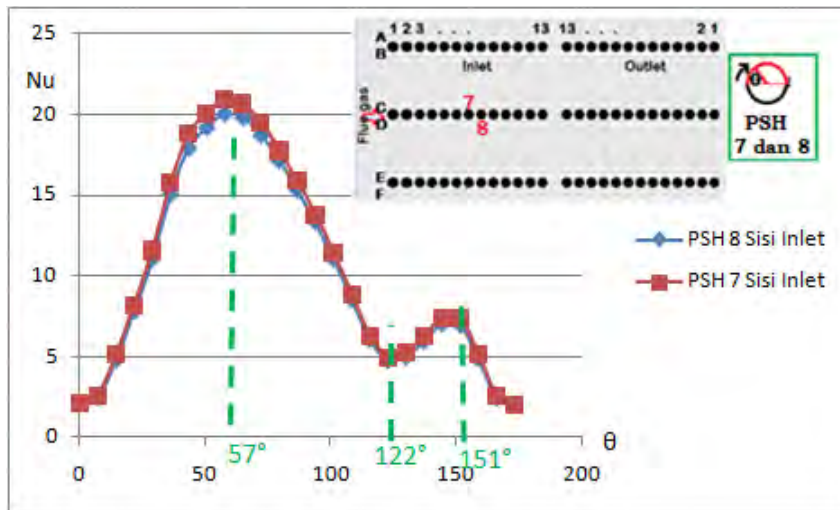
Gambar 4.11. Kontur Tekanan *Flue Gas* di Sekitar *Tube* PSH 1C dan 2C Sisi *Inlet*



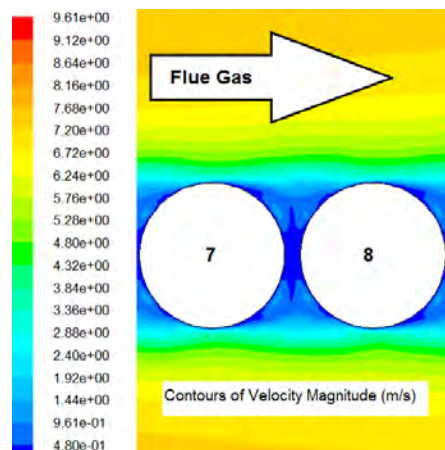
Gambar 4.12 Kontur Temperatur *Flue Gas* di Sekitar *Tube* PSH 1C dan 2C Sisi *Inlet*

- *Tube* PSH 7C dan 8C Sisi *Inlet*

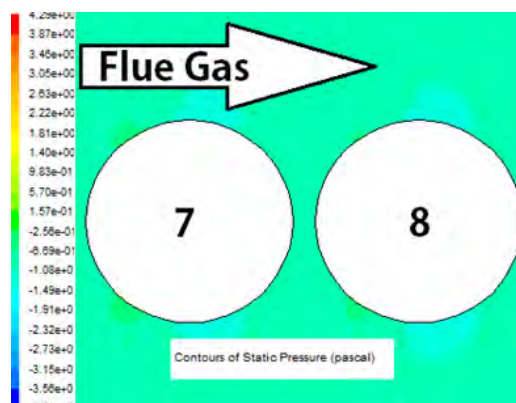
Pada *tube* PSH 7C dan 8C sisi *inlet*, nilai *Nu lokal* maksimal terjadi pada sudut $57,6^\circ$. Distribusi *Nu lokal* pada *tube* PSH 7C dan 8C sisi *inlet* dapat dilihat pada gambar 4.13. Pola distribusi *Nu lokal* pada kedua *tube* tersebut sama dengan pada *tube* PSH 2C. Gambar 4.14, 4.15, dan 4.16 menunjukkan kontur aliran *flue gas* di sekitar kedua *tube*. Kontur kecepatan, tekanan, dan temperatur pada *tube* PSH 7C dan 8C sisi *inlet* sama dengan kontur aliran yang terjadi pada *tube* PSH 2C sisi *inlet*.



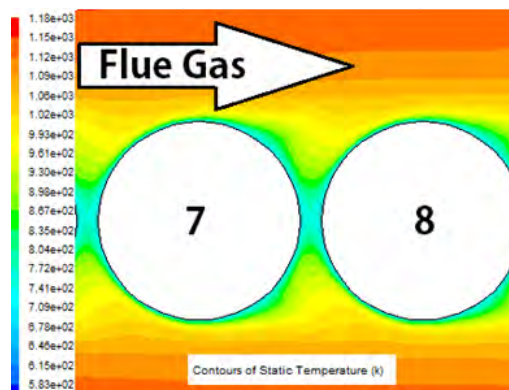
Gambar 4.13 Distribusi Nu lokal *Tube* PSH 7C dan 8C Sisi *Inlet*



Gambar 4.14 Kontur Kecepatan *Flue Gas* di Sekitar *Tube* PSH 8C dan 8C Sisi *Inlet*



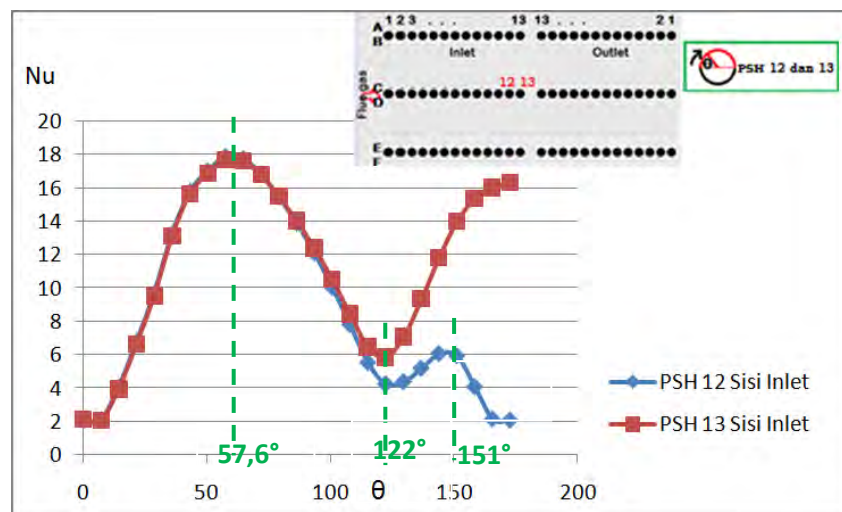
Gambar 4.15. Kontur Tekanan *Flue Gas* di Sekitar *Tube* PSH 8C dan 8C Sisi *Inlet*



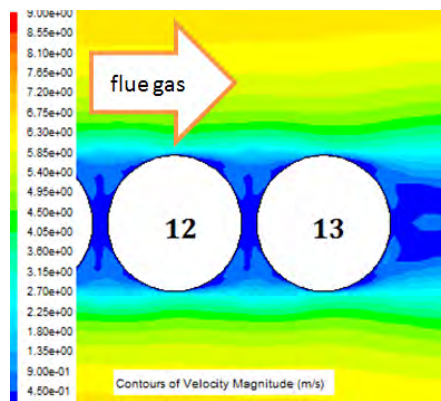
Gambar 4.16 Kontur Temperatur *Flue Gas* di Sekitar *Tube* PSH 7C dan 8C Sisi *Inlet*

- *Tube* PSH 12C dan 13C Sisi *Inlet*

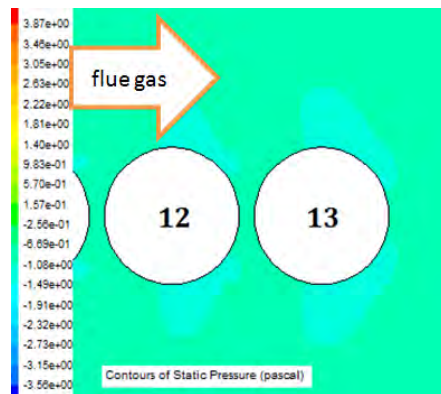
Gambar 4.17 menunjukkan trend distribusi *Nu* lokal *tube* PSH 12C dan 13C sisi *inlet*. Trend distribusi *Nu* lokal pada *tube* PSH 12C sisi *inlet* sama dengan distribusi *Nu* lokal lokal *tube* PSH 2C sisi *inlet*. Kedua *tube* PSH tersebut memiliki *longitudinal pitch ratio* yang sama terhadap *tube* di depan dan belakang. Gambar 4.18, 4.19, dan 4.20 menunjukkan pola aliran *flue gas* pada *tube* PSH 12C sisi *inlet* sama dengan pola aliran yang terjadi pada *tube* PSH 7C sisi *inlet*. Nilai *Nu* lokal maksimal *tube* PSH 12C dan 13C sisi *inlet* terjadi pada sudut $57,6^\circ$. Hal ini sebagai efek dari *attack* aliran *flue gas* setelah melalui *tube* PSH di depannya. Distribusi *Nu* lokal *tube* PSH 12C sisi *inlet* setelah sudut 151° terjadi penurunan. Hal ini yang disebabkan *longitudinal pitch ratio* yang rendah dengan *tube* PSH 13C sisi *inlet*.



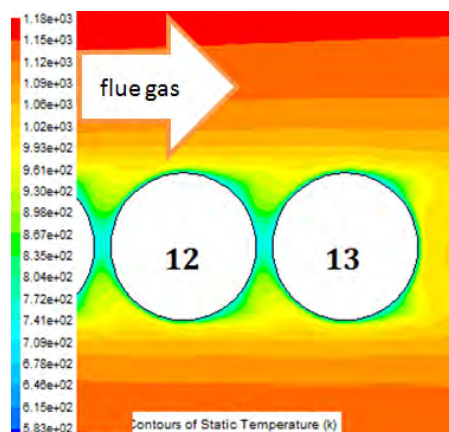
Gambar 4.17 Distribusi *Nu* Lokal *Tube* PSH 12C dan 13C Sisi *Inlet*



Gambar 4.18 Kontur Kecepatan *Flue Gas* di Sekitar *Tube* PSH 12C dan 13C Sisi *Inlet*



Gambar 4.19. Kontur Tekanan *Flue Gas* di Sekitar *Tube* PSH 12C dan 13C Sisi *Inlet*



Gambar 4.20 Kontur Temperatur *Flue Gas* di Sekitar *Tube* PSH 12C dan 13C Sisi *Inlet*

Pada tabel 4.1 diketahui adanya peningkatan nilai Nu lokal rata-rata *tube* PSH 13C sisi *inlet* terhadap nilai Nu lokal *tube* PSH 12C sisi *inlet* pada sudut lebih dari 90° sebesar 5,337 (92,2%). Jarak *longitudinal* antara *tube* PSH 13C sisi

inlet dan *outlet* adalah 118 mm. Jarak *longitudinal* antara *tube* PSH 12C sisi *inlet* dengan PSH 13C sisi *inlet* adalah 60 mm. Diameter *tube* PSH sebesar 54 mm. *Longitudinal pitch ratio* antara *tube* PSH 13C sisi *inlet* dan *outlet* adalah 2,18. Sedangkan *longitudinal pitch ratio* antara *tube* PSH 12C sisi *inlet* dengan *tube* PSH 13C sisi *inlet* adalah 1,11.

Dengan membandingkan nilai Nu lokal rata-rata dari *longitudinal pitch ratio* 2,18 terhadap 1,11 pada sudut lebih dari 90°, laju perpindahan panas pada *tube* di tengah *aligned tube bank* PSH kurang maksimal.

Tabel 4.1 Prosentase Kenaikan Nilai Nu Lokal Rataan pada *Tube* PSH 13C Sisi *Inlet* Terhadap *Tube* PSH 12C Sisi *Inlet* setelah Sudut θ 90°

θ	Nu lokal PSH 12C Sisi <i>Inlet</i>	Nu Lokal PSH 13C Sisi <i>Inlet</i>
93.6	12.0974	12.3874
100.8	10.0325	10.495
108	7.79086	8.43152
115.2	5.51982	6.45625
122.4	4.23981	5.82694
129.6	4.37085	7.07345
136.8	5.17318	9.3327
144	6.06426	11.83
151.2	5.91581	14.0124
158.4	4.06453	15.3572
165.6	2.13663	16.0143
172.8	2.07015	16.3142
Nu lokal rata-rata	5.78965	11.1276
% Kenaikan Nu lokal Rataan	92.2%	

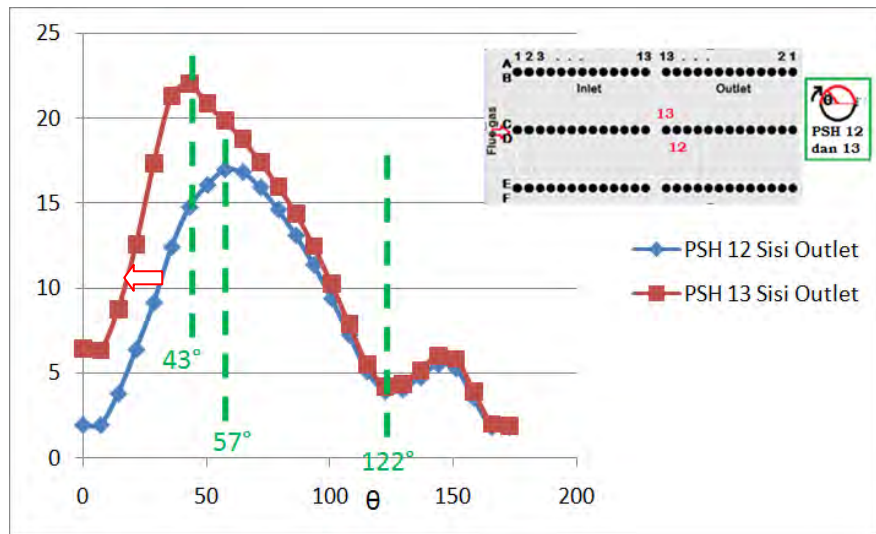
Laju Perpindahan Panas di *Tube* PSH 1C dan 13C Sisi *Outlet*

- *Tube* PSH 13C dan 12C Sisi *Outlet*

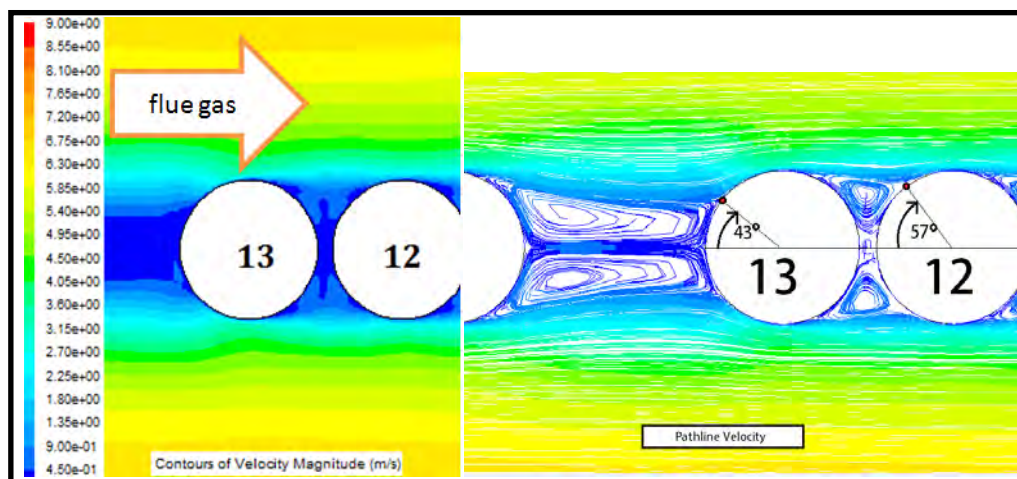
Pada gambar 4.21, terjadi perbedaan distribusi Nu lokal maksimal. Pada *tube* PSH 13C sisi *outlet*, nilai Nu lokal maksimal terjadi pada sudut 43°. Sedangkan pada *tube* PSH 12C sisi *outlet*, nilai Nu lokal maksimal terjadi pada

sudut 57° . Hal ini disebabkan oleh jarak dengan *tube* di depan. *Longitudinal pitch ratio* antara *tube* PSH 13C sisi *outlet* dengan dengan *tube* di depan (PSH 13C sisi *inlet*) adalah 2,18.

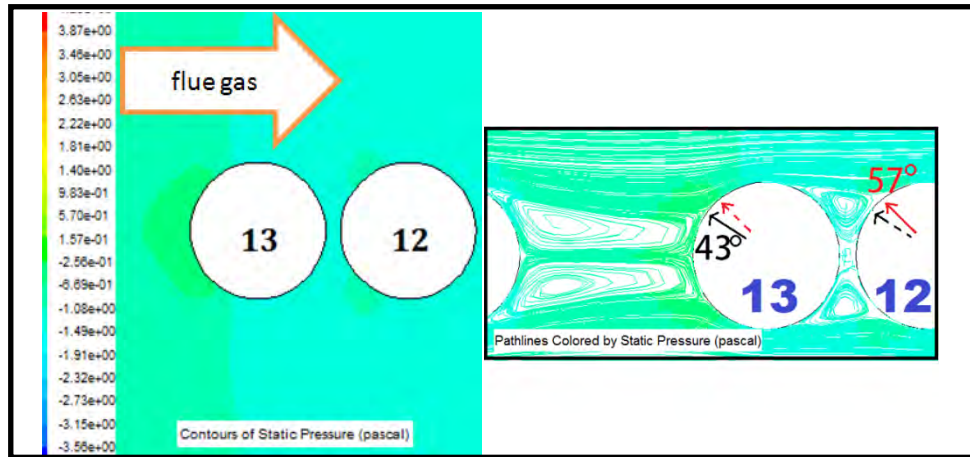
Besarnya nilai *longitudinal pitch ratio* inilah yang akan mempengaruhi besarnya Nu lokal dan sisi sudut *tube* dengan nilai Nu lokal maksimal. Gambar 4.22, 4.23, dan 4.24 menunjukkan aliran kecepatan, tekanan, dan temperatur pada *tube* PSH 12C dan 13C sisi *outlet*. Distribusi Nu lokal pada kedua *tube* tersebut di atas sudut 90° relatif sama.



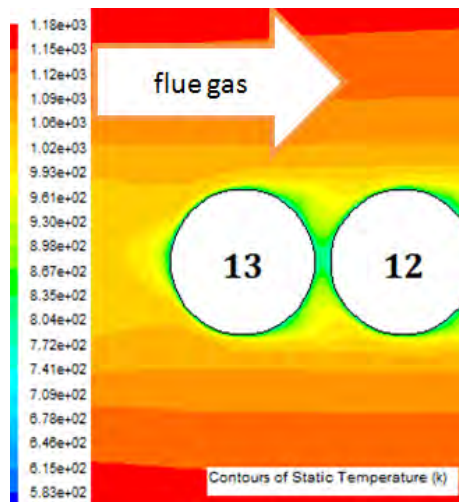
Gambar 4.21 Distribusi Nu Lokal *Tube* PSH 12C dan 13C Sisi *Outlet*



Gambar 4.22 Kontur dan *Pathline* Kecepatan *Flue Gas* di Sekitar *Tube* PSH 12C dan 13C Sisi *Outlet*



Gambar 4.23. Kontur dan *Pathline* Tekanan *Flue Gas* di Sekitar *Tube* PSH 12C dan 13C Sisi *Outlet*



Gambar 4.24 Kontur Temperatur *Flue Gas* di Sekitar *Tube* PSH 12C dan 13C Sisi *Outlet*

Pada tabel 4.2 diketahui peningkatan nilai *Nu* lokal rata-rata *tube* PSH 13C sisi *outlet* terhadap nilai *Nu* lokal *tube* PSH 12C sisi *outlet* pada sudut kurang dari 90° sebesar 4,49 (40,6%). Jarak *longitudinal* antara *tube* PSH 12C sisi *outlet* dengan PSH 13C sisi *outlet* adalah 60 mm. *Longitudinal pitch ratio* antara *tube* PSH 12C sisi *outlet* dengan *tube* PSH 13C sisi *outlet* adalah 1,11. *Longitudinal pitch ratio* antara *tube* PSH 13C sisi *outlet* dengan *tube* di depan (PSH 13C sisi *inlet*) adalah 2,18.

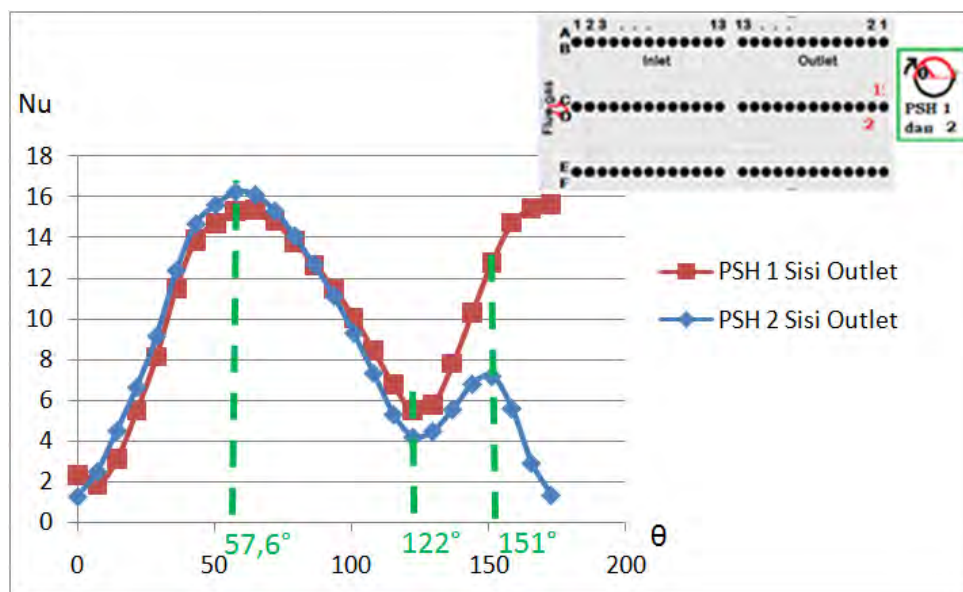
Dengan membandingkan nilai *Nu* lokal rata-rata dari *longitudinal pitch ratio* 2,18 terhadap 1,11 pada sudut kurang dari 90° , laju perpindahan panas pada *tube* di tengah *aligned tube bank* PSH kurang maksimal.

Tabel 4.2 Prosentase Kenaikan Nilai Nu Lokal Rataan pada *Tube* PSH 13C Sisi Outlet Terhadap *Tube* PSH 12C Sisi Outlet Sebelum Sudut θ 90°

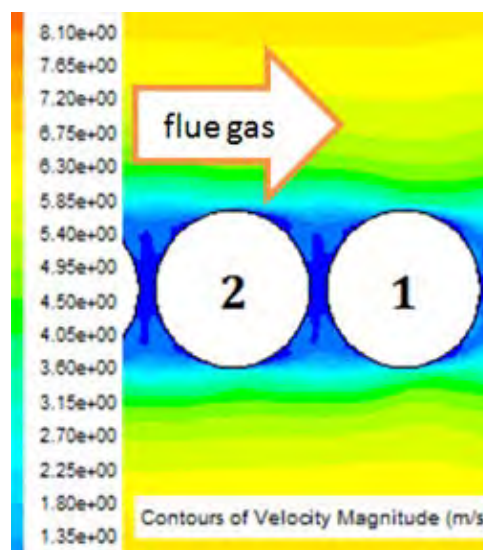
θ	Nu Lokal PSH 12C Sisi Outlet	Nu Lokal PSH 13C Sisi Outlet
0	1.95671	6.48604
7.2	1.96052	6.3652
14.4	3.79765	8.78067
21.6	6.38544	12.579
28.8	9.14756	17.3538
36	12.4194	21.3256
43.2	14.7613	22.0545
50.4	16.0599	20.8666
57.6	16.9669	19.8704
64.8	16.8195	18.7739
72	15.9289	17.4414
79.2	14.6086	16.0067
86.4	13.0964	14.4062
Nu lokal rata-rata	11.0699	15.5623
% Kenaikan Nu lokal rata-rata	40.6%	

- *Tube* PSH 1C dan 2C Sisi Outlet

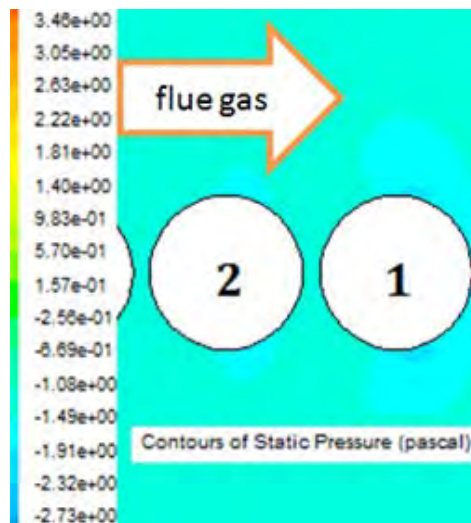
Gambar 4.25 menunjukkan distribusi Nu lokal pada *tube* PSH 1C dan 2C sisi outlet. Pada sudut dibawah 90°, kedua *tube* menunjukkan pola distribusi Nu lokal yang sama, namun setelah 90°, nilai distribusi Nu lokal pada *tube* PSH 1C sisi outlet lebih tinggi dengan trend distribusi yang hampir sama. Setelah melewati sudut 151°, nilai Nu lokal pada *tube* PSH 1C berbeda dengan PSH 2C sisi outlet karena *wake* yang terjadi pada belakang *tube* PSH 1C sisi outlet lebih sempurna. Gambar 4.26, 4.27, dan 4.28 menunjukkan kontur aliran kecepatan, tekanan, dan temperatur *flue gas* di sekitar *tube* 1C dan 2C sisi outlet.



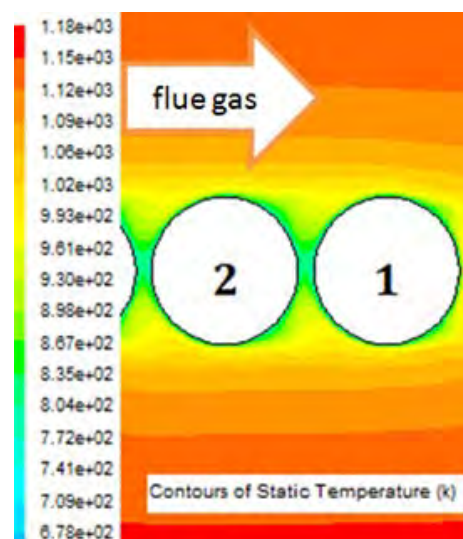
Gambar 4.25 Distribusi Nu lokal *Tube* PSH 1C dan 2C Sisi *Outlet*



Gambar 4.26 Kontur Kecepatan *Flue Gas* di Sekitar *Tube* PSH 1C dan 2C Sisi *Outlet*



Gambar 4.27. Kontur Tekanan *Flue Gas* di Sekitar *Tube* PSH 1C dan 2C Sisi
Outlet



Gambar 4.28 Kontur Temperatur *Flue Gas* di Sekitar *Tube* PSH 1C dan 2C Sisi
Outlet

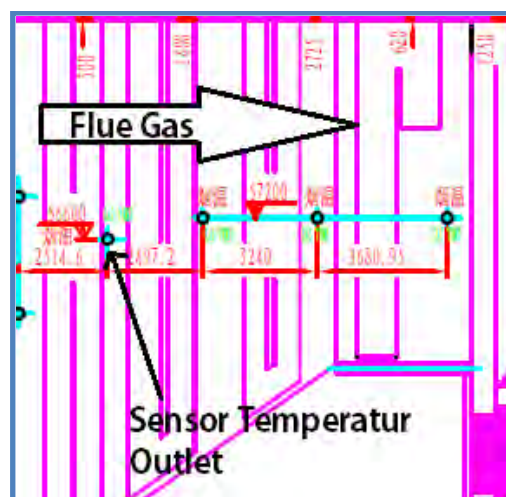
4.4. Validasi

Validasi temperatur *flue gas* menggunakan data MCR. Proses validasi yang dilakukan adalah membandingkan nilai temperatur *flue gas* yang keluar pada area susunan *tube* PSH dengan hasil pengukuran yang terlihat pada *display* CCR. Dari data tabel 4.3, panjang sensor yang terukur adalah 1,1 meter. Pada gambar 4.30, panjang bagian yang masuk ke dalam sekitar 40 cm. Posisi sensor berada di ujung dengan diberikan proteksi agar kabel sensor tidak mudah rusak.

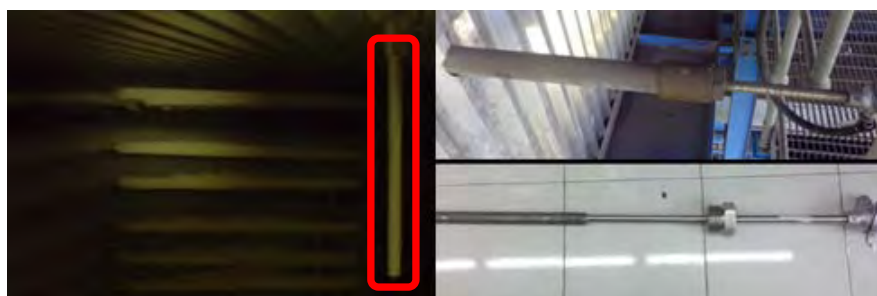
Tabel 4.3. Data Spesifik Peralatan Sensor Temperatur *Boiler* PLTU Unit Pacitan

THERMOCOUPLE 电站专用型热电偶	A SIDE FURNACE GAS TEMPERATURE AT HORIZONTAL GAS DUCT A侧炉膛水平烟道烟温	K type, duplex, accuracy $\pm 0.2\%$, armoured core, SS316 protection pipe, L/l=1380mm/1130mm, fixed screw: M60X3, with waterproof SS terminal box, IP65, electrical joint: M20X1.5. Process pressure: 0~2KPa K分度, 双支, 精度 $\pm 0.2\%$, 铠装芯, SS316保护管, L/l=1380mm/1130mm, 固定螺钉: M60X3, 防水型不锈钢接线盒, IP65, 电气接口: M20X1.5。工作压力: 0~2KPa
THERMOCOUPLE 电站专用型热电偶	B SIDE FURNACE GAS TEMPERATURE AT HORIZONTAL GAS DUCT B侧炉膛水平烟道烟温	K type, duplex, accuracy $\pm 0.2\%$, armoured core, SS316 protection pipe, L/l=1380mm/1130mm, fixed screw: M60X3, with waterproof SS terminal box, IP65, electrical joint: M20X1.5. Process pressure: 0~2KPa K分度, 双支, 精度 $\pm 0.2\%$, 铠装芯, SS316保护管, L/l=1380mm/1130mm, 固定螺钉: M60X3, 防水型不锈钢接线盒, IP65, 电气接口: M20X1.5。工作压力: 0~2KPa

Gambar 4.29 dan gambar 4.30 menampilkan posisi penempatan sensor temperatur *flue gas* di area PSH PLTU Pacitan dan *spare part* sensor temperatur dalam kondisi belum terpasang.



Gambar 4.29 Posisi *Sensor Temperatur* Area Outlet PSH



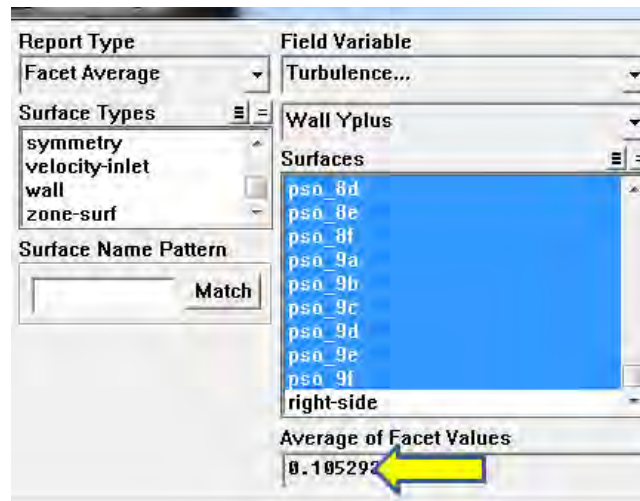
Gambar 4.30 Kondisi *Sensor Temperatur* Terpasang dan *Spare Part*

Data temperatur *flue gas outlet* terukur pada hasil *fluent* adalah 1075°K. Pada tabel 3.1, data temperatur *flue gas outlet* terukur pada *display* CCR adalah 1071,4°K. Dari kedua data didapatkan validasi sebesar 1 %.

4.5. Wall Y+

Wall Y+ adalah *direction axis* y pada sebuah *wall*. Y+ dapat menunjukkan nilai *velocity* aliran yang terjadi di layer terkecil pada sisi *wall*. Nilai *velocity* pada layer merupakan fungsi dari logaritma. Penentuan nilai Y+ berdasarkan Re. Nilai Y+ rendah digunakan untuk aliran dengan nilai Re yang rendah karena dapat menunjukkan nilai *velocity* pada daerah *viscous sub-layer*. Daerah ini merupakan daerah yang jauh dari area *visible*.

Pada umumnya batas penerimaan Y+ adalah kurang dari 11. Jika $Y+ < 1$, berarti *direction axis* y berada di *viscous sub-layer*. Pada gambar 4.31, penelitian ini menghasilkan nilai *wall* Y+ sebesar 0,105



Gambar 4.31 Nilai Wall Y+ Tube PSH

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan beberapa hal:

1. Desain susunan *tube* PSH mempunyai nilai laju perpindahan panas yang kurang baik dikarenakan jarak antar tube secara *transversal* terlalu besar dan jarak antar *tube* secara *longitudinal* terlalu kecil. Hal ini disebabkan oleh desain yang dibuat oleh pihak manufaktur.
2. Laju perpindahan panas terbaik terjadi pada grup *tube* PSH 1 sisi *inlet*. Nilai Nu rata-rata pada *tube* PSH1 sisi *inlet* adalah sebesar 27,42 (Kondisi MCR) dan 28,43 (Kondisi BMCR).
3. Tidak ada perbedaan *nusselt number* yang signifikan terhadap perbedaan dari variasi beban operasi yang digunakan. Nilai *nusselt number* pada beban operasi BMCR sedikit lebih tinggi daripada saat kondisi beban operasi MCR. Hal ini disebabkan karena perbedaan vektor kecepatan *flue gas* sisi *inlet* yang lebih besar.
4. Dengan membandingkan distribusi Nu lokal rata-rata pada sudut $90^\circ < \theta < 180^\circ$, laju perpindahan panas *tube* PSH 13C sisi *inlet* mengalami peningkatan sebesar 92,2% terhadap *tube* PSH 12C sisi *inlet*.
5. Dengan membandingkan distribusi Nu lokal rata-rata pada sudut $0^\circ < \theta < 90^\circ$, laju perpindahan panas *tube* PSH 13C sisi *outlet* mengalami peningkatan sebesar 40,6% terhadap *tube* PSH 12C sisi *outlet*.
6. Susunan *aligned tube bank* PSH dengan *longitudinal pitch ratio* 2,18 akan memberikan laju perpindahan panas *tube* lebih baik dibandingkan dengan susunan *aligned tube bank* PSH dengan *longitudinal pitch ratio* 1,11 pada sudut $0^\circ < \theta < 180^\circ$.

5.2. Saran

1. Penelitian ini dapat ditindaklanjuti untuk dilakukan penelitian yang akan datang pada semua peralatan *superheater* dan *reheater* di *boiler* sehingga mengetahui proses perpindahan panas yang terbaik diantara peralatan tersebut.

Lampiran1. Komposisi *Flue Gas* pada *Performance Test* Beban MCR

I) 100%MCR

PG test for boiler efficiency operation condition is 100%MCR, This item of test was carried out for 2 times. The operating duration was 4 hours for each test; 100%MCR first official test and second official test calculated result refer to table3(Lower Heat Value Basis).

Table 3: 100%MCR first and second official test calculation result(Lower Heat Value Basis)

No	Item	Symbol	Unit	1 st Test	2 nd Test	Explanation
	Test Coal (As Received)					
1	Carbon	C _{ar}	kg/kg	0.4910	0.4893	Coal Analysis Report
2	Hydrogen	H _{ar}	kg/kg	0.0326	0.0347	Coal Analysis Report
3	Oxygen	O _{ar}	kg/kg	0.1187	0.1121	Coal Analysis Report
4	Nitrogen	N _{ar}	kg/kg	0.0084	0.0074	Coal Analysis Report
5	Sulphur	S _{ar}	kg/kg	0.0048	0.0050	Coal Analysis Report
6	Moisture	M _{ar}	kg/kg	0.2885	0.2959	Coal Analysis Report
7	Ash	A _{ar}	kg/kg	0.0561	0.0557	Coal Analysis Report
8	Volatile	V _{daf}	kg/kg	0.3250	0.3209	Coal Analysis Report
9	Lower heat value	H _l	kJ/kg	18283.76	18133.03	Coal Analysis Report
	Ambient Air					
10	Atmospheric pressure	P _A	kPa	101.00	100.86	Measured
11	Ambient air temperature (dry bulb)	t _w	°C	30.6	30.1	Measured
	Ambient air temperature (wet bulb)	t _d	°C	29.1	29.0	Measured
	ash and slag					
12	Unburned carbon in fly ash	u _{Cf}	%	0.67	0.71	Fly ash Analysis Report
13	Unburned carbon in bottom ash	u _{Co}	%	0.88	1.17	Bottom ash Analysis Report
	Gas					
14	Oxygen	[O ₂] _{AO}	%	4.48	4.51	Measured
15	Carbon dioxide	[CO ₂] _{AO}	%	15.08	14.86	Calculated
16	Carbon monoxide	[CO] _{AO}	%	0.002	0.003	Measured

Lampiran2. Komposisi *Flue Gas* pada *Performance Test* Beban BMCR

II) BMCR(Steam flow: 1025t/h)

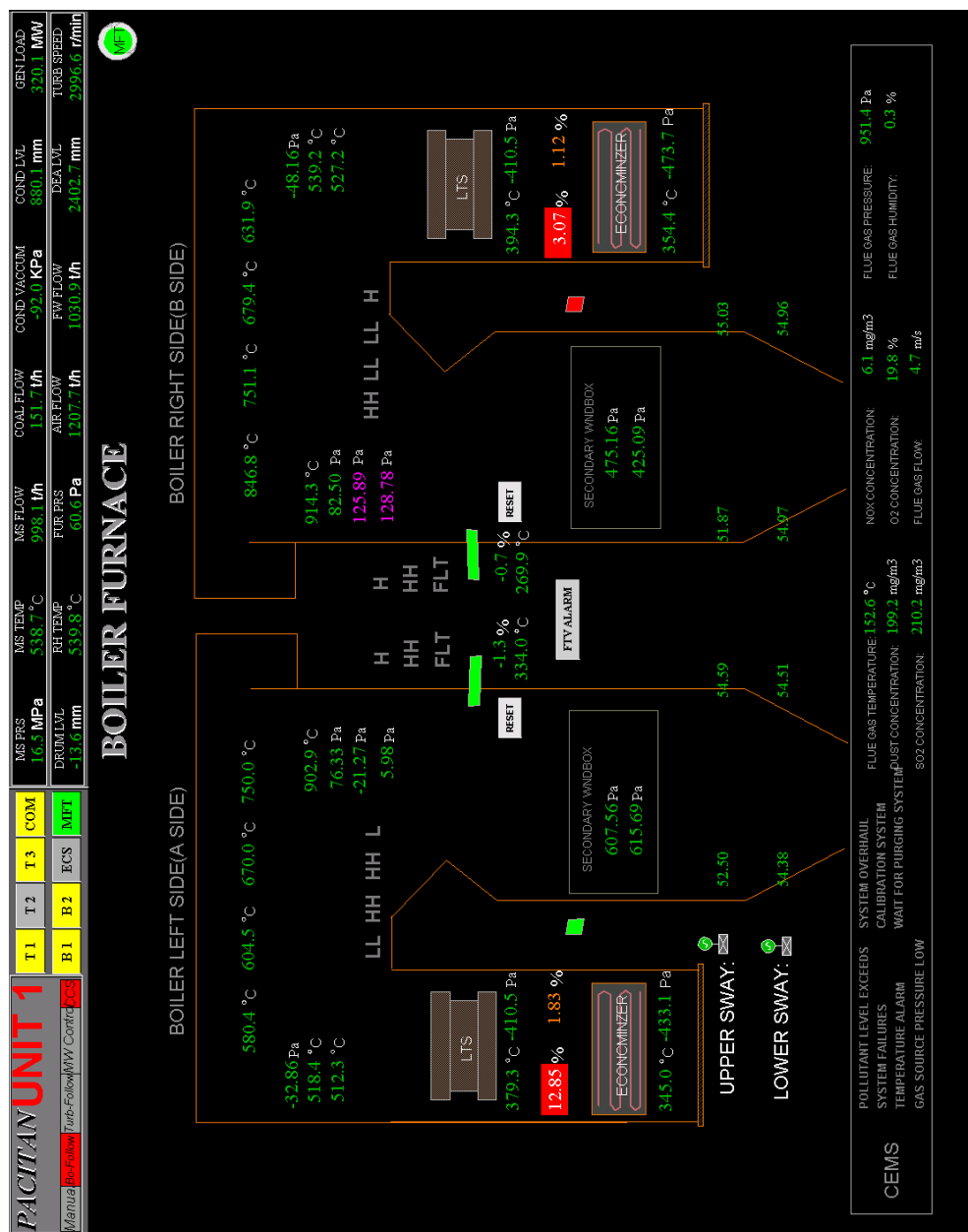
BMCR test calculated result refer to table4.

Table 4: BMCR test calculated result (Lower Heat Value Basis)

No	Item	Symbol	Unit		Explanation
	Test (As Received)				
1	Carbon	C_{ar}	kg/kg	0.4929	Coal Analysis Report
2	Hydrogen	H_{ar}	kg/kg	0.0352	Coal Analysis Report
3	Oxygen	O_{ar}	kg/kg	0.0574	Coal Analysis Report
4	Nitrogen	N_{ar}	kg/kg	0.0075	Coal Analysis Report
5	Sulphur	S_{ar}	kg/kg	0.0045	Coal Analysis Report
6	Moisture	M_{ar}	kg/kg	0.2890	Coal Analysis Report
7	Ash	A_{ar}	kg/kg	0.1135	Coal Analysis Report
8	Volatile	V_{daf}	kg/kg	0.3272	Coal Analysis Report
9	Lower Heat value	H_l	kJ/kg	18317.25	Coal Analysis Report
	Ambient Air				
10	Atmospheric pressure	P_a	kPa	101.05	Measured


No	Item	Symbol	Unit		Explanation
11	Ambient air temperature (dry bulb)	t_w	°C	28.2	Measured
12	Ambient air temperature (wet bulb)	t_d	°C	27.2	Measured
	ash and slag				
13	Unburned carbon in fly ash	u_{cf}	%	0.58	Fly ash Analysis Report
14	Unburned carbon in bottom ash	u_{cb}	%	0.49	Bottom ash Analysis Report
	Gas				
15	Oxygen	$[O_2]_{ao}$	%	5.00	Measured
16	Carbon dioxide	$[CO_2]_{ao}$	%	13.97	Calculated
17	Carbon monoxide	$[CO]_{ao}$	%	0.002	Measured
18	Gas temperature leaving AH A	$t_{GAO(1)}$	°C	144.8	Measured
19	Gas temperature leaving AH B	$t_{GAO(2)}$	°C	145.2	Measured
20	Gas temperature leaving AH	t_{GAO}	°C	145.0	Calculated
21	Efficiency	η_g	%	92.15	Calculated
22	Corrected boiler efficiency	η_{gC}	%	92.36	Calculated

Lampiran3. Data Performance Test Display CCR pada Beban MCR



Lampiran4. Data Manufaktur Dongfang Beban MCR

Doc.No. 110M-JS2HGW		RESULT OF HEAT TRANSFER PERFORMANCE CALCULATION FOR BOILER				Page 5 of 17		Rev. A
FUEL: WOOD COAL (DESIGN COAL)		LOAD: SRL		AIR TEMP AT AIR PREHEATER INLET: 30 °C			2009/ 4/ 28	
SH FLOW	D1 t/h	971.1	BOILER EFFICIENCY	Q1 %	93.24	SH DESUPERHE TYPE	—	JET WATER
SH OUTLET PRESS	P1 MPa(a)	17.42	TOTAL FUEL FIRED	B t/h	154.13	SH1ST DSH JETWATER	ΔD1 t/h	12.75
SH OUTLET TEMP	T1 °C	541.	TOTAL CAL FUEL FIRED	Rp t/h	152.90	SH2ND DSH JETWATER	ΔD2 t/h	4.45
RH INLET FLOW	D2 t/h	798.1	THEORETICAL AIR	X0 Kg/Kg	4.70	RH ADJUSTABLE TEMP	—	JET WATER
RH INLET PRESS	P1 MPa(a)	3.68	FURNACE RADIANT HEAT	Qr KJ/Kg	9715.1	RH DSH JETWATER	ΔD t/h	3.10
RH OUTLET PRESS	P2 MPa(a)	3.51	FURNACE VOLU INTENS	Qv KW/m2	84.32	AMBIENT AIR TEMP	Txb °C	30.
RH OUTLET TEMP	T2 °C	541.	FUR GRATE AREA INTEN	Qg KW/m2	3728.10	FUR FOULING COEFF	E	—
DRUM PRESSURE	P MPa(a)	18.67	FURNACE SURF. INTEN	Qh KW/m2	111.58	COMBUSTION COR FAC	M	—
FEED WATER TEMP	T1 °C	277.	FURNACE VOLUME	Vt m3	8878.00	FURNAC OUTLET TEMP	T °C	972.
RH INLET TEMP	TJ °C	323.	EXCESS AIR FUR OUTLE	α	1.20			
DESCRIPTION	GAS INLET TEMP	GAS OUTLET TEMP	MEDIA INLET TEMP	MEDIA OUTLET TEMP	EXCESS AIR COEFF	GAS AVERAGE VELOCITY	MEDIA AVERAGE VELOCITY	
SYMBOL	Tg1	Tg2	T1	T2	α	Wg	Wb	
UNIT	°C	°C	°C	°C	—	m/s	m/s	
DIVIS. PANEL	1032.	1032.	409.	464.	1.200	0	0	
RAD. WALL. RH	1032.	1032.	318.	391. // 387.	1.200	0	0	
PLATEN	1032.	877.	464.	512. // 508.	1.200	5.2	14.8	
MID. TEMP. RH	972.	867.	387.	485.	1.200	7.4	20.4	
W.C. TUBE 1	867.	840.	360.	360.	1.200	9.0	0	
HIGH TEMP. KH	860.	793.	485.	541.	1.200	9.3	23.4	
W.C. TUBE 2	793.	782.	360.	360.	1.200	10.4	0	
HIGH TEMP. SH	782.	720.	508.	541.	1.200	10.2	11.5	
HANGER TUBE 1	720.	711.	360.	361.	1.200	8.7	15.0	
VERT. L.T. SH	711.	675.	406.	419. // 409.	1.200	10.9	3.7	
CAVITY 1	675.	642.	360.	362.	1.200	7.5	3.9	
EDR. L.T. SH	642.	433.	363.	404.	1.200	10.1	3.0	
ECO. 1	433.	385.	277.	291. // 298.	1.220	8.0	0	
NOTE 1. // SHOW MEDIA TEMP AFTER DESSUPERHEATER OR MEDIATEMP FROM ECONOMIZER SING TUBES OUTLET TO DRUM.								
ROTARY AIR PREHEATER :								
GAS INLET TEMP	°C	343	PRIMARY AIR INLET TEMP	°C	30	PRIMARY AIR INLET FLOW	t/h	341.9
GAS OUTLET TEMP (UNCOR.)	°C	136	PRIMARY AIR OUTLET TEMP	°C	358	PRIMARY AIR OUTLET FLOW	t/h	326.0
GAS OUTLET TEMP (CORR.)	°C	131	SECONDARY AIR INLET TEMP	°C	30	SECONDARY AIR INLET FLOW	t/h	805.3
A.H. LEAKAGE RATIO(CALC.)	%	5.98	SECONDARY AIR OUTLET TEMP	°C	353	SECONDARY AIR OUTLET FLOW	t/h	803.1
BY-PASS AIR FLOW	t/h	58.91	GAS INLET FLOW	t/h	1289.8	GAS OUTLET FLOW	t/h	1366.9

 东方电气
DONGFANG ELECTRIC

东方锅炉(集团)股份有限公司
DONGFANG BOILER GROUP CO.,LTD

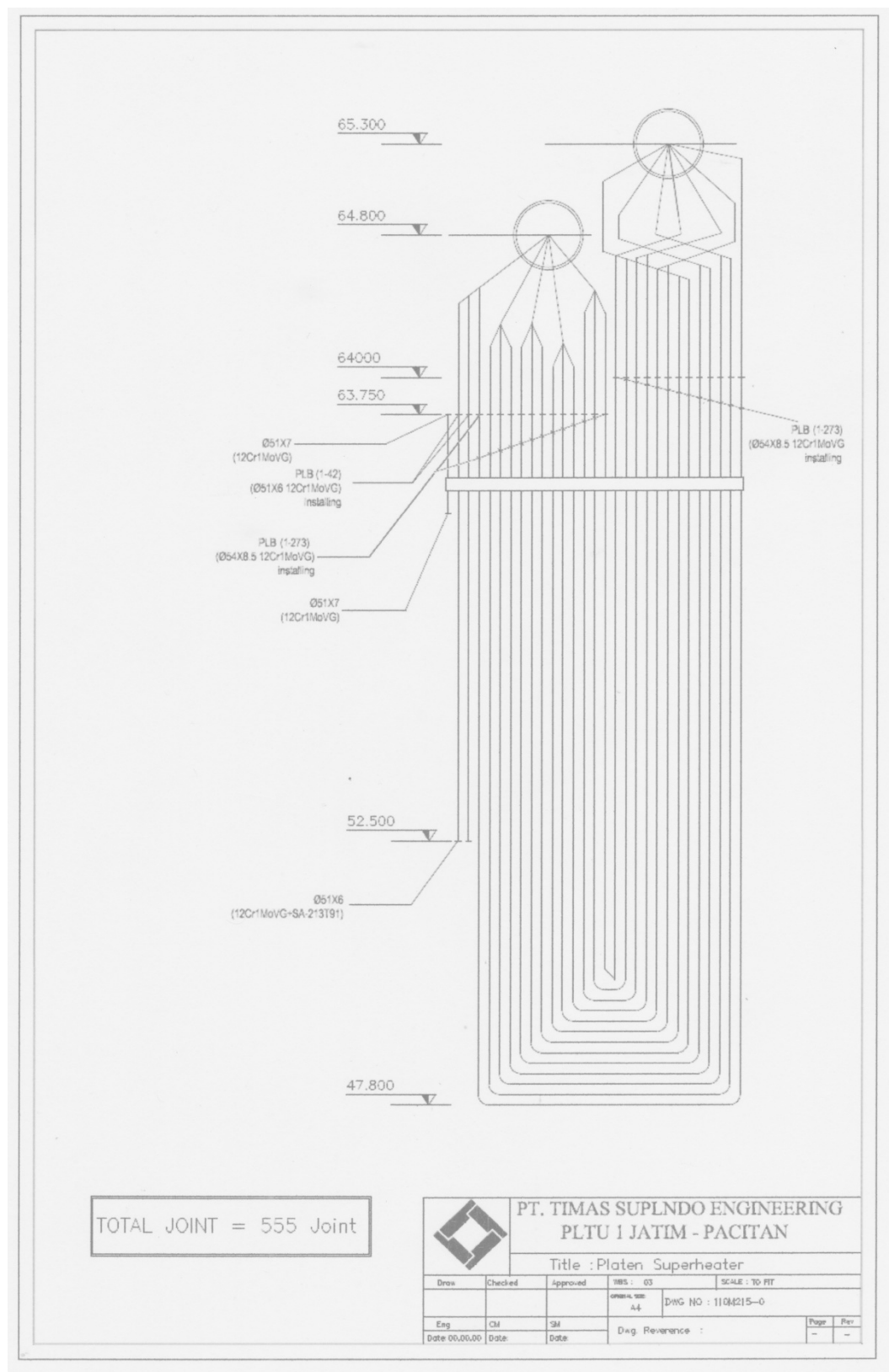
Lampiran5. Data Manufaktur Dongfang Beban BMCR

c.No. 110M-JS2HGW			RESULT OF HEAT TRANSFER PERFORMANCE CALCULATION FOR BOILER				Page 4 of 17		Rev. A	
FUEL: WOOD COAL (DESIGN COAL)			LOAD: BMCR		AIR TEMP AT AIR PREHEATER INLET: 30. °C			2009/ 4/ 28		
H FLOW	D1	t/h	1025.0	BOILER EFFICIENCY	Q1	%	93.16	SH DESUPERHE TYPE	—	JET WATER
H OUTLET PRESS	P1	MPa (a)	17.50	TOTAL FUEL FIRED	B	t/h	162.13	SH1ST DSH JETWATER	ΔD1	t/h 16.58
H OUTLET TEMP	T1	°C	541.	TOTAL CAL-FUEL FIRED	Bp	t/h	160.84	SH2ND DSH JETWATER	ΔD2	t/h 6.14
H OUTLET FLOW	D2	t/h	839.4	THEORETICAL AIR	VO	kg/kg	4.70	RH ADJUSTABLE TEMP	—	JET WATER
H INLET PRESS	P3	MPa (a)	3.86	FURNACE RADIANT HEAT	Q1	KJ/kg	9542.1	RH DSH JETWATER	ΔD	t/h 8.58
H OUTLET PRESS	P2	MPa (a)	3.68	FURNACE VOLU INTENS	Qv	KW/m3	88.76	AMBIENT AIR TEMP	Ta,b	°C 30.
H OUTLET TEMP	T2	°C	541.	FUR GRATE AREA INTEN	Qf	KW/m2	3921.57	FUR FOULING COEFF	ξ	— 500
DRUM PRESSURE	P	MPa (a)	18.87	FURNACE SURF. INTEN	Qh	KW/m2	115.38	COMBUSTION COR FAC	M	— 1.42
FEED WATER TEMP	T1	°C	281.	FURNACE VOLUME	V1	m3	8878.00	FURNACE OUTLET TEMP	T*	°C 986.
H INLET TEMP	TJ	°C	329.	EXCESS AIR FUR OUTLE	α	/	1.20			
DESCRIPTION	GAS INLET TEMP		GAS OUTLET TEMP	MEDIA INLET TEMP	MEDIA OUTLET TEMP	EXCESS AIR COEFF	GAS AVERAGE VELOCITY	MEDIA AVERAGE VELOCITY		
SYMBOL	Tg1		Tg2	T1	T2	α	Wg	Wb		
UNIT	°C		°C	°C	°C	—	m/s	m/s		
DIVIS. PANEL	1048.		1048.	410.	463.	1.200	.0	.0		
RAD. WALL RH	1048.		1048.	329.	395. // 384.	1.200	.0	.0		
PLATES	1048.		986.	463.	511. // 507.	1.200	6.6	15.5		
MID. TEMP. RH	986.		877.	384.	483.	1.200	7.8	20.5		
W.C. TUBE 1	877.		870.	361.	361.	1.200	9.6	.0		
HIGH TEMP. RH	870.		800.	483.	541.	1.200	9.9	25.5		
W.C. TUBE 2	800.		789.	361.	361.	1.209	11.0	.0		
HIGH TEMP. SH	789.		725.	507.	541.	1.200	10.8	12.0		
HANGER TUBE 1	725.		716.	361.	361.	1.200	9.2	15.6		
VERT. L.T.SH	716.		679.	405.	418. // 410.	1.200	11.5	9.9		
CAVITY 1	679.		647.	361.	362.	1.200	7.9	4.1		
HOR. L.T.SH	647.		434.	363.	404.	1.200	10.7	3.1		
ECD. 1	434.		385.	281.	294. // 301.	1.220	8.4	.0		
NOTE : // SHOW MEDIA TEMP AFTER DESSUPERHEATER OR MEDIA TEMP FROM ECONOMIZER SING TUBES OUTLET TO DRUM.										
ROTARY AIR PREHEATER :										
GAS INLET TEMP	°C	385	PRIMARY AIR INLET TEMP	°C	30	PRIMARY AIR INLET FLOW	t/h	352.7		
GAS OUTLET TEMP(UNCOR.)	°C	136	PRIMARY AIR OUTLET TEMP	°C	360	PRIMARY AIR OUTLET FLOW	t/h	330.9		
GAS OUTLET TEMP(CORR.)	°C	131	SECONDARY AIR INLET TEMP	°C	30	SECONDARY AIR INLET FLOW	t/h	857.9		
A.E. LEAKAGE RATIO(CALC.)	%	5.80	SECONDARY AIR OUTLET TEMP	°C	351	SECONDARY AIR OUTLET FLOW	t/h	854.74		
BY-PASS AIR FLOW	t/h	53.48	GAS INLET FLOW	t/h	1333.9	GAS OUTLET FLOW	t/h	1432.3		
<div><div><div>DEC</div><div>东方电气</div><div>DONGFANG ELECTRIC</div></div><div>东方锅炉(集团)股份有限公司</div><div>DONGFANG BOILER GROUP CO.,LTD</div></div>										

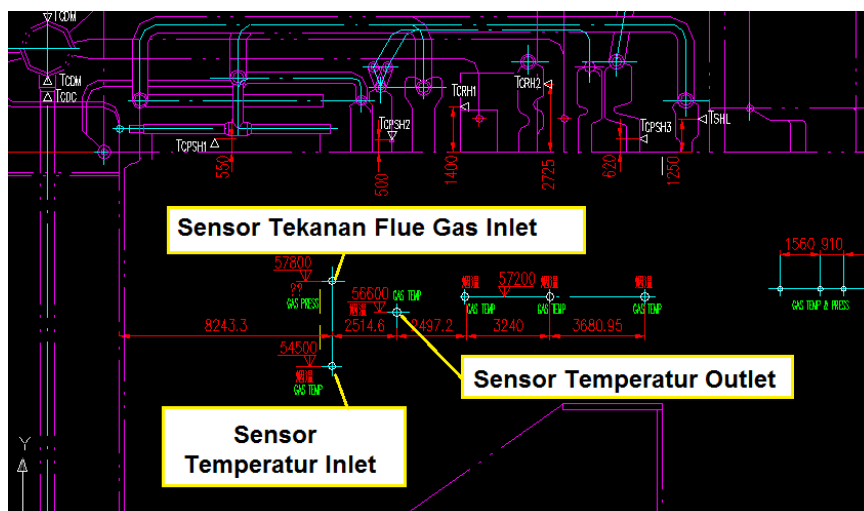
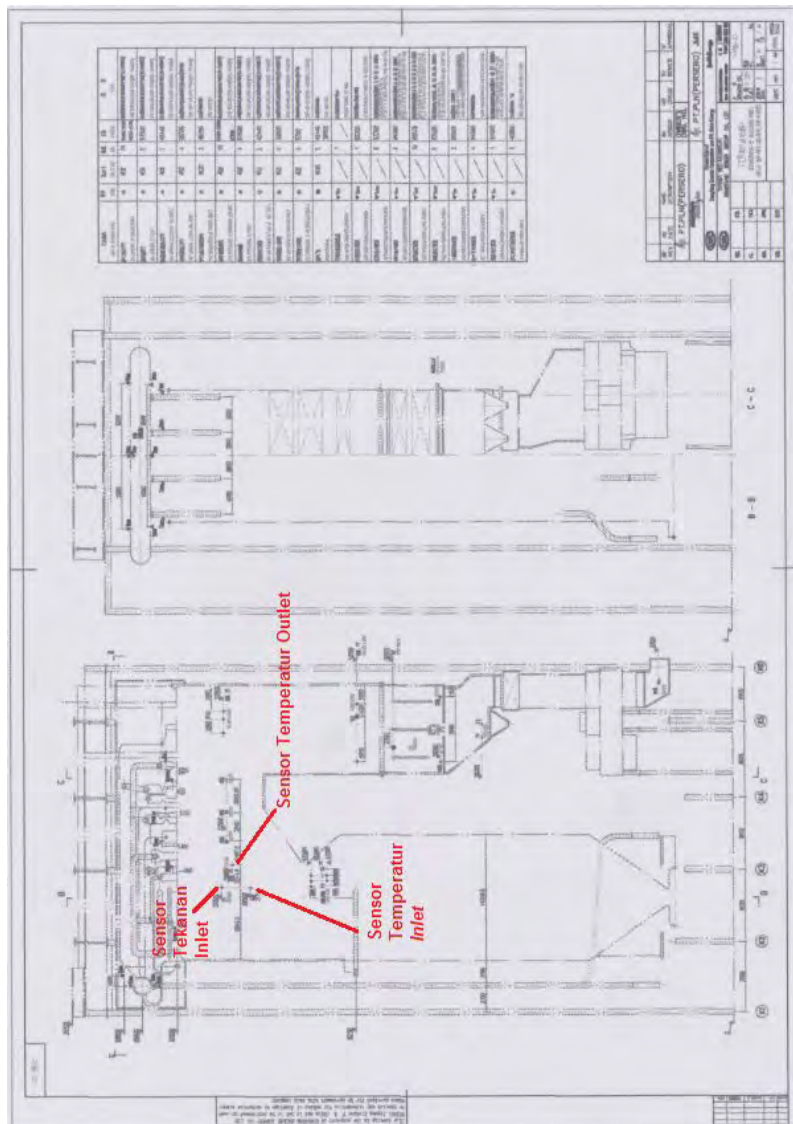
Lampiran6. Data Boiler Operational Manual Book

No.	Item	Unit	Design value	Remark
6	Rear platen superheater 1) Type 2) Pipe quantity 3) Pipe diameter and wall thickness 4) Material 5) Wall temperature control 6) Alarm wall temperature 7) Heating area	— Mm — — °C — °C m ²	Radiant convention type 21 sheets×13 pieces φ54×8.5 12Cr1MoV SA—213T91 SA—213TP347H 526 560 1401.3	21 sheets
7	Secondary superheater : 1) Type 2) Pipe quantity 3) pipe diameter and wall thickness 4) Material 5) Wall temperature control 6) Alarm wall temperature 7) Heating area	— Mm — — °C °C m ²	convection 84sheets×6pieces φ51×9 φ51×8 12CrMoV、12Cr2Mo1TiB <575 575 2138.1	84 sheets

Lampiran7. Data Susunan *Aligned Tubebanks Platen Superheater* dalam 1 Row



Lampiran8. Data Posisi Sensor



Lampiran9. Data Nu Rataan *Grup Tube PSH* Beban MCR dan BMCR

No	Group Tube	MCR		BMCR
1	PSH Sisi Inlet 1	27.42066	PSH Sisi Inlet 1	28.43448
2	PSH Sisi Inlet 2	17.12271	PSH Sisi Inlet 2	17.88406
3	PSH Sisi Inlet 3	14.5229	PSH Sisi Inlet 3	15.20259
4	PSH Sisi Inlet 4	13.11327	PSH Sisi Inlet 4	13.74368
5	PSH Sisi Inlet 5	12.20601	PSH Sisi Inlet 5	12.80245
6	PSH Sisi Inlet 13	11.91605	PSH Sisi Inlet 13	12.44396
7	PSH Sisi Outlet 13	11.68733	PSH Sisi Inlet 13	12.09786
8	PSH Sisi Inlet 6	11.55461	PSH Sisi Inlet 6	12.12555
9	PSH Sisi Outlet 1	11.08062	PSH Sisi Inlet 7	11.60872
10	PSH Sisi Inlet 7	11.05732	PSH Sisi Inlet 1	11.52889
11	PSH Sisi Inlet 8	10.66186	PSH Sisi Inlet 8	11.1971
12	PSH Sisi Inlet 9	10.33828	PSH Sisi Inlet 9	10.85932
13	PSH Sisi Inlet 10	10.06863	PSH Sisi Inlet 10	10.57716
14	PSH Sisi Inlet 11	9.844599	PSH Sisi Inlet 11	10.3421
15	PSH Sisi Inlet 12	9.681494	PSH Sisi Inlet 12	10.17144
16	PSH Sisi Outlet 12	9.093873	PSH Sisi Inlet 2	8.798053
17	PSH Sisi Outlet 11	8.722812	PSH Sisi Inlet 12	9.504992
18	PSH Sisi Outlet 10	8.540909	PSH Sisi Inlet 11	9.13348
19	PSH Sisi Outlet 9	8.421422	PSH Sisi Inlet 10	8.94933
20	PSH Sisi Outlet 2	8.391671	PSH Sisi Inlet 9	8.827456
21	PSH Sisi Outlet 8	8.329451	PSH Sisi Inlet 8	8.733497
22	PSH Sisi Outlet 7	8.255352	PSH Sisi Inlet 7	8.657831
23	PSH Sisi Outlet 6	8.1972	PSH Sisi Inlet 6	8.598433
24	PSH Sisi Outlet 3	8.191898	PSH Sisi Inlet 3	8.591853
25	PSH Sisi Outlet 5	8.157909	PSH Sisi Inlet 5	8.558276
26	PSH Sisi Outlet 4	8.147358	PSH Sisi Inlet 4	8.547316

Lampiran10. Data Nu Rataan Grup Tube PSH 1, 7, 13 Beban MCR

Sudut Θ	Nu pada Tube PSH Sisi Inlet 1C (MCR)	Nu pada Tube PSH Sisi Inlet 7C (MCR)	Nu pada Tube PSH Sisi Inlet 13C (MCR)	Nu pada Tube PSH Sisi Outlet 1C (MCR)	Nu pada Tube PSH Sisi Outlet 7C (MCR)	Nu pada Tube PSH Sisi Outlet 13C (MCR)
0	47.7535	2.19722	2.10595	2.34031	1.83623	6.48604
7.2	48.5753	2.66442	2.0546	1.84611	1.62735	6.3652
14.4	49.378	5.1767	3.91581	3.10749	3.07856	8.78067
21.6	48.7862	8.26672	6.6076	5.47385	5.36791	12.579
28.8	47.3525	11.664	9.52823	8.1427	7.82675	17.3538
36	45.3514	15.8365	13.0932	11.5112	10.7408	21.3256
43.2	42.5926	18.7624	15.6511	13.8919	12.8724	22.0545
50.4	39.5559	20.0685	16.849	14.6999	14.0716	20.8666
57.6	36.8247	20.9104	17.6757	15.2668	14.945	19.8704
64.8	34.2571	20.6368	17.6079	15.3275	14.9264	18.7739
72	31.6301	19.4757	16.7876	14.7861	14.2239	17.4414
79.2	28.7086	17.8182	15.4946	13.81	13.106	16.0067
86.4	25.283	15.9658	14.0213	12.6924	11.7904	14.4062
93.6	21.3322	13.8833	12.3874	11.4965	10.2694	12.4863
100.8	16.9991	11.5021	10.495	10.0817	8.49848	10.2779
108	13.0947	8.92621	8.43152	8.47608	6.57509	7.89034
115.2	10.7397	6.35539	6.45625	6.77409	4.63448	5.527
122.4	10.5065	4.99811	5.82694	5.49503	3.5215	4.25263
129.6	11.8602	5.2737	7.07345	5.79002	3.58077	4.40476
136.8	14.0077	6.29349	9.3327	7.79601	4.19778	5.18973
144	16.4769	7.43431	11.83	10.3296	4.86803	6.04746
151.2	16.9712	7.3992	14.0124	12.8167	4.63413	5.85416
158.4	13.2638	5.24129	15.3572	14.7122	3.07527	3.97426
165.6	7.11044	2.61205	16.0143	15.431	1.66173	2.03408
172.8	4.16267	2.06625	16.3142	15.6127	1.80294	1.91883

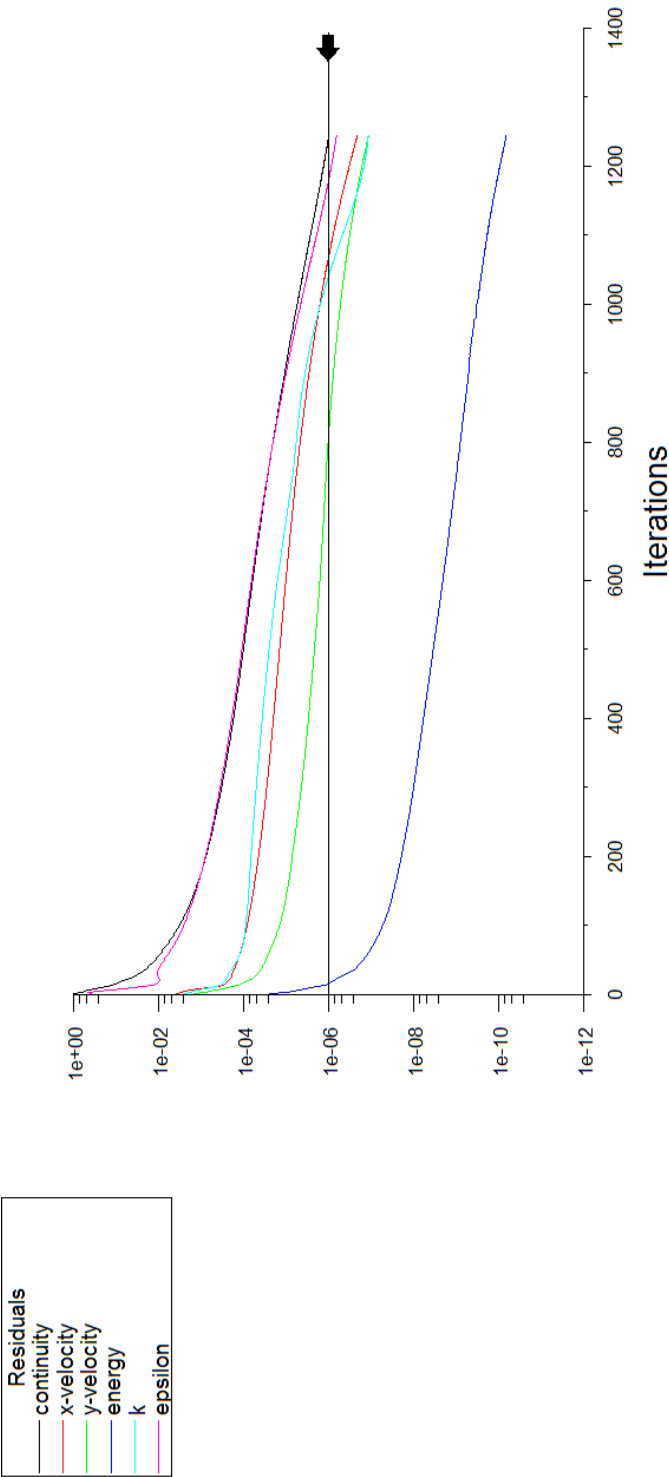
Lampiran11. Data Nu Lokal *Tube* PSH 1, 7, 13 Beban BMCR

Sudut Θ	Nu pada Tube PSH Sisi Inlet 1C (BMCR)	Nu pada Tube PSH Sisi Inlet 7C (BMCR)	Nu pada Tube PSH Sisi Inlet 13C (BMCR)	Nu pada Tube PSH Sisi Outlet 1C (BMCR)	Nu pada Tube PSH Sisi Outlet 7C (BMCR)	Nu pada Tube PSH Sisi Outlet 13C (BMCR)
0	49.4121	2.37401	2.25607	2.55185	1.96064	6.63914
7.2	50.2629	2.93019	2.25163	2.02203	1.78919	6.59749
14.4	51.0803	5.58503	4.24393	3.32946	3.35383	9.15957
21.6	50.4383	8.79714	7.05647	5.79504	5.74612	13.0737
28.8	48.932	12.3656	10.1242	8.58294	8.32316	17.975
36	46.8483	16.7745	13.8914	12.1096	11.4017	22.0673
43.2	43.9911	19.8326	16.5643	14.5859	13.6338	22.8156
50.4	40.8586	21.1067	17.7429	15.3864	14.8266	21.5793
57.6	38.0446	21.9003	18.5358	15.9315	15.672	20.545
64.8	35.3973	21.5667	18.4193	15.9593	15.6081	19.4028
72	32.6888	20.3185	17.5251	15.3647	14.8392	18.0122
79.2	29.6808	18.5657	16.1484	14.324	13.649	16.5199
86.4	26.1553	16.6268	14.5961	13.1412	12.2684	14.8692
93.6	22.0799	14.4611	12.8859	11.881	10.6862	12.9005
100.8	17.5988	11.9945	10.9161	10.4026	8.85124	10.6402
108	13.638	9.32742	8.77336	8.73592	6.85749	8.19249
115.2	11.315	6.66879	6.72944	6.97399	4.84467	5.76503
122.4	11.0764	5.28935	6.10374	5.68294	3.70987	4.47006
129.6	12.4346	5.61623	7.41178	6.05499	3.80782	4.65934
136.8	14.6599	6.71554	9.73255	8.15361	4.48323	5.50781
144	17.2613	7.95476	12.2892	10.7491	5.22168	6.44445
151.2	17.873	7.99298	14.5332	13.2984	5.02766	6.30662
158.4	14.14	5.76816	15.9315	15.2384	3.39788	4.36097
165.6	7.69997	2.9082	16.6351	15.9714	1.83906	2.23478
172.8	4.51435	2.21997	16.9622	16.1546	1.93189	2.02169

Lampiran12. Data Nu Lokal Tube PSH 1C-D, 7C-D Sisi Inlet Beban MCR

Sudut Θ	Nu pada Tube PSH Sisi Inlet 1C (MCR)	Nu pada Tube PSH Sisi Inlet 1D (MCR)	Nu pada Tube PSH Sisi Inlet 7C (MCR)	Nu pada Tube PSH Sisi Inlet 7D (MCR)
0	47.7535	47.7535	2.19722	2.19722
7.2	48.5753	48.5522	2.66442	4.03821
14.4	49.378	49.37	5.1767	6.64083
21.6	48.7862	48.7898	8.26672	9.41854
28.8	47.3525	47.3637	11.664	12.7882
36	45.3514	45.369	15.8365	17.0903
43.2	42.5926	42.6147	18.7624	20.0637
50.4	39.5559	39.579	20.0685	21.2614
57.6	36.8247	36.8479	20.9104	21.9958
64.8	34.2571	34.2826	20.6368	21.6167
72	31.6301	31.6593	19.4757	20.3458
79.2	28.7086	28.7431	17.8182	18.5839
86.4	25.283	25.3332	15.9658	16.6416
93.6	21.3322	21.3841	13.8833	14.4789
100.8	16.9991	17.0488	11.5021	12.0192
108	13.0947	13.1697	8.92621	9.37372
115.2	10.7397	10.8776	6.35539	6.79386
122.4	10.5065	10.7422	4.99811	5.60552
129.6	11.8602	12.2051	5.2737	6.221
136.8	14.0077	14.4911	6.29349	7.67565
144	16.4769	17.1556	7.43431	9.37344
151.2	16.9712	17.8917	7.3992	9.93992
158.4	13.2638	14.3704	5.24129	7.91197
165.6	7.11044	7.91085	2.61205	4.33435
172.8	4.16267	4.16267	2.06625	2.06625

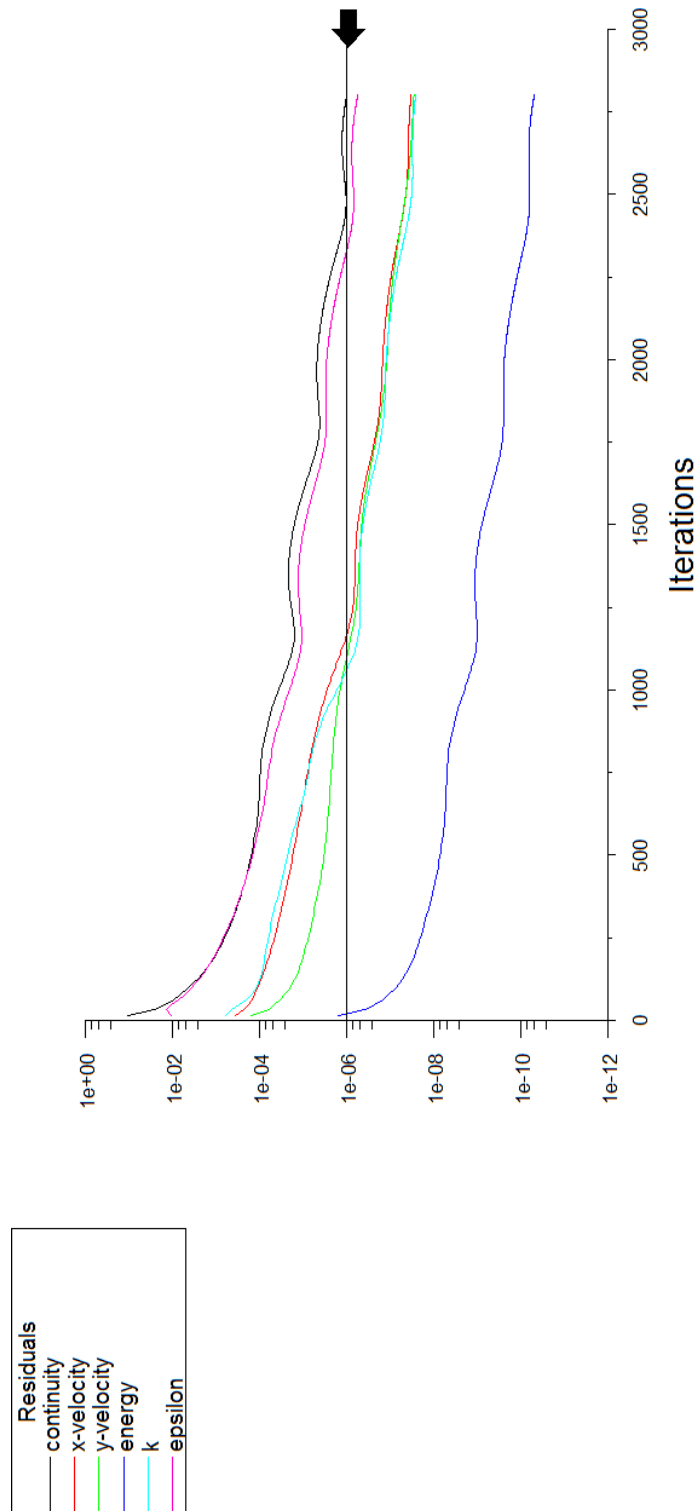
Lampiran13. Simulasi Konvergen pada Beban MCR



Jan 22, 2015
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbrns, ske)

Scaled Residuals

Lampiran14. Simulasi Konvergen pada Beban BMCR



Scaled Residuals

Jan 22, 2015
FLUENT 6.3 (2d, dp, pbns, ske)